



TITLE:

平面ひずみ条件における土の力学
特性に関する研究(Dissertation_全
文)

AUTHOR(S):

木全, 卓

CITATION:

木全, 卓. 平面ひずみ条件における土の力学特性に関する研究. 京都大学
, 1997, 博士(農学)

ISSUE DATE:

1997-03-24

URL:

<https://doi.org/10.11501/3123643>

RIGHT:

平面ひずみ条件における
土の力学特性に関する研究

1997

木 全 卓

目次

第1章 緒論	1
1.1 概説	1
1.2 背景	1
1.3 研究の目的と概要	4
第2章 平面ひずみ試験	7
2.1 概説	7
2.2 平面ひずみ試験の特徴	7
2.2.1 平面ひずみ試験のイメージ	7
2.2.2 土質力学試験の種類と特徴	9
2.2.3 三軸試験との比較	11
2.2.4 応力・変形条件の特性	12
2.2.5 中間主応力の評価パラメータ	13
第3章 自動計測・自動制御平面ひずみ試験システム	15
3.1 概説	15
3.2 試験システムの概要・特長	15
3.3 試験装置	18
3.3.1 平面ひずみセル	18
3.3.2 载荷装置	19
3.3.3 体積変化測定用セル	21
3.4 計測・制御システム	22
3.4.1 コントローラ・ユニット	22
3.4.2 パソコン	23
3.4.3 各種変換器	23
3.4.4 ロードセルの製作と検定	25
3.4.5 計測・制御精度	28
3.5 自動計測・自動制御プログラム	30
3.5.1 特徴	30
3.5.2 計測・制御方法	30
3.5.3 メインプログラム	31
3.5.4 サブプログラム	33

第4章 試料および供試体の作製	36
4.1 概説	36
4.2 砂供試体の作製	36
4.2.1 物理特性	36
4.2.2 作製方法	37
4.2.3 ゴムスリーブ装着用型枠の製作	38
4.3 粘土供試体の作製	40
4.3.1 物理特性	40
4.3.2 作製方法	40
4.3.3 予備圧密セルの作製	42
第5章 砂の静的平面ひずみ挙動	45
5.1 概説	45
5.2 試験方法	45
5.3 等方圧密静的せん断挙動	48
5.3.1 等方圧密非排水せん断	48
5.3.2 等方圧密排水せん断	55
5.3.3 構築した試験システムによって得られた結果の検討	60
5.4 異方圧密静的せん断挙動	62
5.4.1 異方圧密	62
5.4.2 異方圧密非排水せん断	67
5.4.3 異方圧密排水せん断	72
5.4.4 圧密履歴の違いが及ぼす影響について	79
5.5 まとめ	84
第6章 粘土の静的平面ひずみ挙動	88
6.1 概説	88
6.2 試験方法	88
6.3 粘土の静的せん断挙動	90
6.3.1 異方(K ₀)圧密	90
6.3.2 K ₀ 正規圧密非排水せん断	94
6.3.3 K ₀ 過圧密非排水せん断	99
6.4 まとめ	104
6.4.1 正規圧密・過圧密の関係	104
6.4.2 砂との比較	109

第7章 砂の非排水繰返し平面ひずみ挙動	111
7.1 概説	111
7.2 試験方法	111
7.2.1 一斉試験の載荷条件との相違点	112
7.2.2 砂の非排水繰返し載荷試験手順	113
7.3 砂の非排水繰返し載荷挙動	115
7.3.1 等方圧密非排水繰返し載荷	116
7.3.2 異方圧密非排水繰返し載荷	123
7.3.3 異方圧密非排水繰返し載荷(軸圧・セル圧両振り)	133
7.4 まとめ	140
第8章 粘土の非排水繰返し平面ひずみ挙動	144
8.1 概説	144
8.2 試験方法	144
8.3 粘土の非排水繰返し載荷挙動	146
8.3.1 K ₀ 正規圧密非排水繰返し平面ひずみ挙動	146
8.3.2 三軸挙動との比較	153
8.3.3 過圧密状態も含めた非排水繰返し平面ひずみ挙動	157
8.4 まとめ	165
第9章 中間主応力係数を用いた平面ひずみ強度の推定	169
9.1 概説	169
9.2 種々の試験でのb値	169
9.3 b値を用いた平面ひずみ強度の計算	176
9.3.1 前提条件	176
9.3.2 計算式の誘導	177
9.3.3 実験結果との比較・考察	178
9.4 まとめ	182
第10章 結論	183
10.1 概説	183
10.2 砂の静的せん断挙動について	183
10.3 粘土の静的せん断挙動について	184
10.3.1 正規圧密・過圧密の関係	185
10.3.2 砂との比較	186

10.4	砂の非排水繰返し載荷挙動について	187
10.4.1	平面ひずみ条件・三軸条件の違いについて	187
10.4.2	繰返し載荷条件の違いについて	187
10.4.3	液状化強度について	189
10.5	粘土の非排水繰返し載荷挙動について	189
10.5.1	平面ひずみ条件・三軸条件の違いについて	189
10.5.2	過圧密状態も含めた非排水繰返し平面ひずみ挙動について	190
10.6	中間主応力係数を用いた平面ひずみ強度の推定について	191

参考文献	192
------	-----

付録

謝辞

図・表リスト

第1章 緒論

図 1-01	平面ひずみ試験とその概念図	2
--------	-------------------------	---

第2章 平面ひずみ試験

図 2-01	平面ひずみ試験のイメージ図	8
図 2-02	平面ひずみ試験で再現可能な供試体の応力・ひずみ条件	13
図 2-03	中間主応力パラメータの幾何学的意味	13

表 2-01	平面ひずみ試験と軸対称三軸圧縮試験の比較	12
--------	--------------------------------	----

第3章 自動計測・制御平面ひずみ試験システム

図 3-01	平面ひずみ試験システムの概要	16
図 3-02	試験システム全体（写真）	17
図 3-03	平面ひずみセル	18
図 3-04	軸圧駆動系統	19
図 3-05	セル圧制御系統	20
図 3-06	体積変化測定用セルの概略	21
図 3-07	コントローラ・ユニット（写真）	22
図 3-08	用いたロードセルの形状	25
図 3-09	ロードセルの検定装置の概略	27

表 3-01	自作ロードセルの精度	28
表 3-02	計測精度（理論上の計算による概略値）	29
表 3-03	制御精度（理論上の計算による概略値）	30
表 3-04	基準出力レベル	31

第4章 試料および供試体の作製

図 4-01	平面ひずみ供試体用型枠	37
--------	-----------------------	----

図 4-02 ゴムスリーブ装着用型枠	39
図 4-03 平面ひずみ供試体用アタッチメント (写真)	41
図 4-04 予備圧密セル (写真)	42
図 4-05 予備圧密セルの断面図	43
表 4-01 豊浦砂の物理特性	37
表 4-02 カオリン粘土の物理特性	40

第5章 砂の静的平面ひずみ挙動

図 5-01 圧密径路の概念図	47
図 5-02 応力-ひずみ関係 (等方圧密非排水せん断)	51
図 5-03 応力径路 (等方圧密非排水せん断)	52
図 5-04 間隙水圧-軸ひずみ関係 (等方圧密非排水せん断)	53
図 5-05 中間主応力係数-軸ひずみ関係 (等方圧密非排水せん断)	54
図 5-06 応力-ひずみ関係 (等方圧密排水せん断)	58
図 5-07 応力径路 (等方圧密排水せん断)	58
図 5-08 体積ひずみ-軸ひずみ関係 (等方圧密排水せん断)	59
図 5-09 中間主応力係数-軸ひずみ関係 (等方圧密排水せん断)	59
図 5-10 初期間隙比-内部摩擦角の関係	61
図 5-11 異方圧密応力径路	64
図 5-12 応力-ひずみ関係 (異方圧密)	65
図 5-13 側方ひずみ-偏差応力関係 (異方圧密)	66
図 5-14 間隙水圧-軸ひずみ関係 (異方圧密非排水せん断)	70
図 5-15 応力-ひずみ関係 (異方圧密非排水せん断)	70
図 5-16 応力径路 (異方圧密非排水せん断)	71
図 5-17 中間主応力係数-軸ひずみ関係 (異方圧密非排水せん断)	71
図 5-18 応力-ひずみ関係 (異方圧密排水せん断)	75
図 5-19 応力径路 (異方圧密排水せん断)	76
図 5-20 体積ひずみ-軸ひずみ関係 (異方圧密排水せん断)	77
図 5-21 中間主応力係数-軸ひずみ関係 (異方圧密排水せん断)	78
図 5-22 応力-ひずみ関係 (異方圧密履歴の違い)	82
図 5-23 体積ひずみ-軸ひずみ関係 (異方圧密履歴の違い)	82
図 5-24 応力-ひずみ関係 (せん断初期部分)	83
図 5-25 体積ひずみ-軸ひずみ関係 (せん断初期部分)	83

図 5-26 π 平面応力径路 (排水・非排水)	87
図 5-27 π 平面応力径路 (等方圧密・異方圧密)	87
表 5-01 供試体条件・試験結果の一覧 (等方圧密非排水せん断)	49
表 5-02 供試体条件・試験結果の一覧 (等方圧密排水せん断)	55
表 5-03 供試体条件・試験結果の一覧 (異方圧密非排水せん断)	67
表 5-04 供試体条件・試験結果の一覧 (異方圧密排水せん断)	72
表 5-05 異方圧密後の供試体条件の一覧	80
表 5-06 軸ひずみ・体積ひずみの比較	80

第6章 粘土の静的平面ひずみ挙動

図 6-01 圧密径路の概念図	90
図 6-02 応力-ひずみ関係 (異方圧密)	92
図 6-03 応力径路 (異方圧密)	92
図 6-04 K値-軸ひずみ関係 (異方圧密)	93
図 6-05 側方ひずみ-軸ひずみ関係 (異方圧密)	93
図 6-06 応力-ひずみ関係 (正規圧密)	97
図 6-07 応力径路 (正規圧密)	97
図 6-08 間隙水圧-軸ひずみ関係 (正規圧密)	98
図 6-09 中間主応力係数-軸ひずみ関係 (正規圧密)	98
図 6-10 応力-ひずみ関係 (過圧密)	102
図 6-11 応力径路 (過圧密)	102
図 6-12 間隙水圧-軸ひずみ関係 (過圧密)	103
図 6-13 中間主応力係数-軸ひずみ関係 (過圧密)	103
図 6-14 正規化した応力-ひずみ関係	107
図 6-15 正規化した応力径路	107
図 6-16 正規化した間隙水圧-軸ひずみ関係	108
図 6-17 π 平面応力径路	108
表 6-01 供試体条件・試験結果の一覧 (正規圧密)	94
表 6-02 供試体条件・試験結果の一覧 (過圧密)	99
表 6-03 過圧密比と軸差応力、間隙水圧の関係	105

第7章 砂の非排水繰返し平面ひずみ挙動

図 7-01 圧密径路の概念図	114
図 7-02 応力径路（等方圧密）	119
図 7-03 応力－ひずみ関係（等方圧密）	119
図 7-04 間隙水圧－軸ひずみ関係（等方圧密）	120
図 7-05 π 平面応力径路（等方圧密）	120
図 7-06 非排水繰返し載荷強度	121
図 7-07 非排水繰返し載荷強度の比較	122
図 7-08 間隙水圧－載荷回数割合（異方圧密）	125
図 7-09 軸ひずみ－載荷回数割合（異方圧密）	125
図 7-10 応力径路（異方圧密）	128
図 7-11 応力－ひずみ関係（異方圧密）	128
図 7-12 間隙水圧－軸ひずみ関係（異方圧密）	129
図 7-13 中間主応力－軸ひずみ関係（異方圧密）	129
図 7-14 π 平面応力径路（異方圧密）	130
図 7-15 軸ひずみの発達状況（異方圧密履歴の違い）	132
図 7-16 間隙水圧の発達状況（異方圧密履歴の違い）	132
図 7-17 間隙水圧－載荷回数割合（異方圧密・両振り）	136
図 7-18 軸ひずみ－載荷回数割合（異方圧密・両振り）	136
図 7-19 応力径路の比較（片振り・両振り）	137
図 7-20 応力－ひずみ関係の比較（片振り・両振り）	137
図 7-21 間隙水圧－軸ひずみ関係の比較（片振り・両振り）	138
図 7-22 セル圧変動を差し引いた間隙水圧挙動の比較（片振り・両振り）	138
図 7-23 π 平面応力径路（片振り・両振り）	139
図 7-24 液状化強度の比較	139
図 7-25 液状化強度の比較（まとめ）	140
表 7-01 供試体条件・試験結果の一覧（等方圧密）	116
表 7-02 供試体条件・試験結果の一覧（異方圧密）	123
表 7-03 供試体条件・試験結果の一覧（両振り試験）	133

第8章 粘土の非排水繰返し平面ひずみ挙動

図 8-01 圧密径路の概念図	145
-----------------	-----

図 8-02 間隙水圧－載荷回数割合（正規圧密）	149
図 8-03 軸ひずみ－載荷回数割合（正規圧密）	149
図 8-04 応力径路（正規圧密）	150
図 8-05 応力－ひずみ関係（正規圧密）	150
図 8-06 間隙水圧－軸ひずみ関係（正規圧密）	151
図 8-07 中間主応力－軸ひずみ関係（正規圧密）	151
図 8-08 π 平面応力径路（正規圧密）	152
図 8-09 間隙水圧－載荷回数割合（平面ひずみ・三軸）	155
図 8-10 軸ひずみ－載荷回数割合（平面ひずみ・三軸）	155
図 8-11 非排水繰返し載荷強度（平面ひずみ・三軸）	156
図 8-12 正規化応力径路（過圧密）	160
図 8-13 応力－ひずみ関係（過圧密・非破壊）	160
図 8-14 正規化間隙水圧－軸ひずみ関係（過圧密）	161
図 8-15 応力－ひずみ関係（過圧密）	161
図 8-16 中間主応力－軸ひずみ関係	162
図 8-17 π 平面応力径路（過圧密）	162
図 8-18 間隙水圧－載荷回数割合（過圧密）	164
図 8-19 軸ひずみ－載荷回数割合（過圧密）	164

表 8-01 供試体条件・試験結果の一覧（正規圧密）	147
表 8-02 供試体条件・試験結果の一覧（三軸）	153
表 8-03 供試体条件の一覧（過圧密）	157

第9章 中間主応力係数を用いた平面ひずみ強度の推定

図 9-01 b 値－軸ひずみ関係（砂・非排水せん断）	172
図 9-02 π 平面応力径路（砂・非排水せん断）	172
図 9-03 b 値－軸ひずみ関係（砂・排水せん断）	173
図 9-04 π 平面応力径路（砂・排水せん断）	173
図 9-05 b 値－軸ひずみ関係（粘土・非排水せん断）	174
図 9-06 π 平面応力径路（粘土・非排水せん断）	174
図 9-07 π 平面応力径路（砂・非排水繰返し載荷）	175
図 9-08 π 平面応力径路（粘土・非排水繰返し載荷）	175
図 9-09 各破壊規準（ π 平面上）	181

第1章 緒論

1.1 概説

土構造物の設計や解析，あるいは，地盤の安定解析などを行う場合，その土の変形・強度特性を表すパラメータをいかに求めるかが重要な問題となる。これらのパラメータは対象とする現場の土を用いた力学試験（土質試験）から求められるのが一般的であるが，この時に実施する土質試験も対象とする現場（土構造物や地盤）の応力・変形条件をできる限り忠実に再現したものでなければならない。従来，これら土質パラメータの決定には三軸試験がよく用いられてきた。この三軸試験は，得られる結果の正確さに加え，初期の圧密段階で現場の様々な応力状態が再現でき，せん断においても種々の応力経路が指定できるなど，汎用性においても極めて高度な試験である。しかしその一方で，せん断時の応力・変形が軸対称条件に限定されるため，その適用範囲は厳密には半無限地盤や盛土の中央部など，水平方向への変形が軸対称であると仮定できる場合に限られる。しかし，対象とする現場には，フィルダムの堤体や堤防などの土構造物，あるいは連続フーチング下の基礎地盤など，平面ひずみ状態にあるものも少なくないのが現状である。このような状態にある土の変形・強度特性を調べる場合，平面ひずみ試験は現場条件を最も忠実に再現できる土質試験の一つであり，物理的に意味のある土質パラメータを決定することができる。

（図 1-01 平面ひずみ試験とその概念図 参照）

本研究では，平面ひずみ条件にある土の挙動を明らかにすることを目的とし，平面ひずみ試験装置（システム）の構築から，この装置を用いた試験データの収集，結果の考察までを行った。対象とした試料は砂と粘土，せん断条件としては排水・非排水の静的せん断と非排水繰返し載荷について行い，土の平面ひずみ挙動全般について検討した。

1.2 背景

平面ひずみ条件における土の力学特性に関する研究は，古くは1960年代ごろから始まっており，この当時の主な論文としては，Cornforth (1964)，Shibata and Karube (1965)，Henkel and Wade (1966)，Hambly and Roscoe (1969)，市原・松沢 (1970)，Lee (1970)，Campanella and Vaid (1973)，などによるものが挙げられる。これらの研究は，軸対称三軸

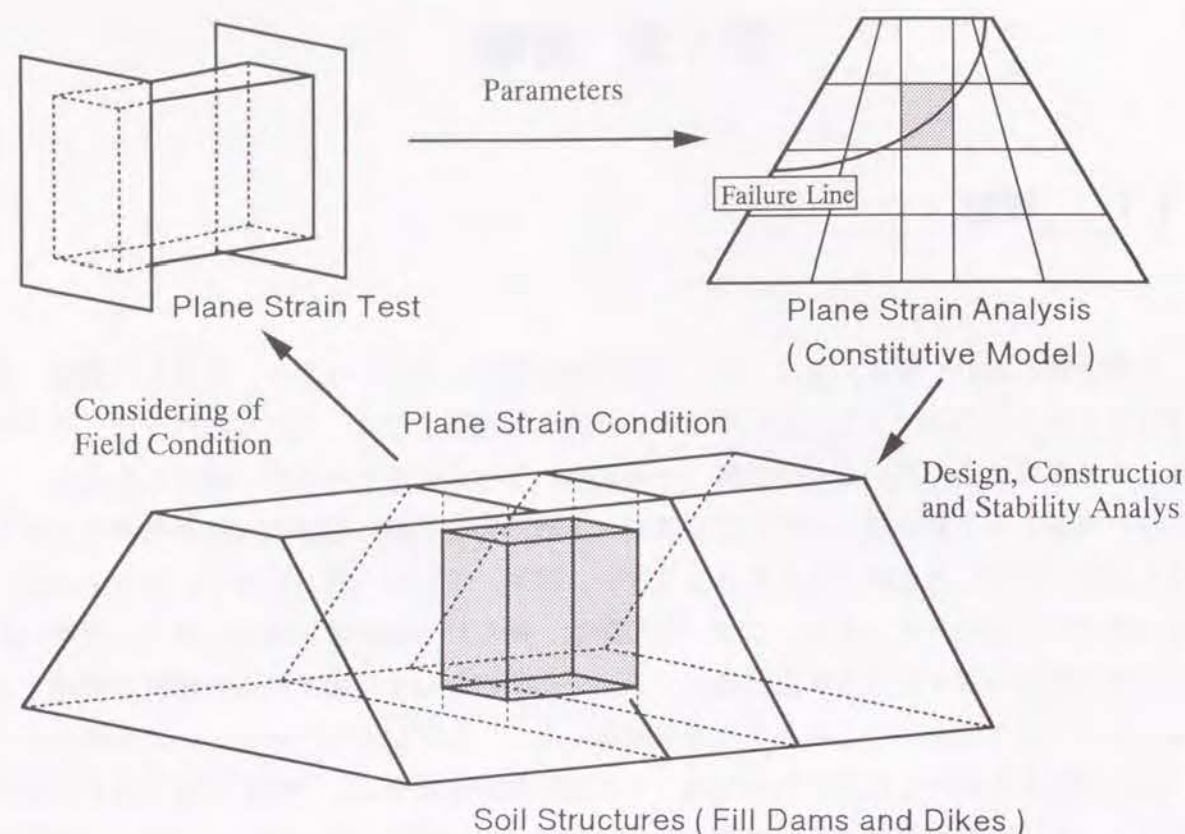


図 1-01 平面ひずみ試験とその概念図
(Image of Plane Strain Test)

条件における土の力学特性（すなわち、通常の三軸圧縮挙動）との比較を主な目的としており、本研究においてもこれは主要なテーマの一つとなっている。これらの論文の中で、市原・松沢 (1970) の乾燥砂を用いた結果を例に、平面ひずみ状態と軸対称三軸状態における主な静的せん断特性の違いを示すと以下のようなものである。

- (1) 試料が軸方向の変形を受けて破壊する場合、軸対称状態の方が平面ひずみ状態よりも大きな部分が破壊される。
- (2) せん断時の応力-ひずみ関係におけるピークは、平面ひずみ状態の方が軸対称状態よりも顕著に表れる。
- (3) 同じ試料を用いた場合、破壊時における主応力差は平面ひずみ状態の方が軸対称状態より 8~15%程度大きい。
- (4) 同じ試料を用いた場合、破壊時における軸ひずみ量は平面ひずみ状態の方が軸対称状態よりやや小さい。
- (5) 同じ試料については、内部摩擦角は平面ひずみ状態の方が軸対称状態よりも大きい。
- (6) せん断初期に表れるダイレイタンスの終了は、平面ひずみ状態の方が軸対称状態よりも小さい軸ひずみで起こる。（破壊時の軸ひずみの 1.5~2 倍程度）

- (7) 同じ試料の破壊時における体積膨張は、平面ひずみ状態の方が軸対称状態よりも小さい。

これらは乾燥砂による試験結果をもとにした比較であるが、ほとんどの部分が飽和試料についてもあてはまると考えられる。その際、ダイレイタンス (dilatancy) 特性については、飽和試料の場合、排水せん断における体積ひずみや非排水せん断における間隙水圧の挙動として定量的に評価することになる。

土の平面ひずみ挙動を三軸のそれと比較する研究は、用いる試料や試験条件などを変えてこれ以降もいろいろ行われているが、平面ひずみ挙動自身に関する研究もいくつかある。主なものを挙げると、供試体寸法・形状に関する研究、主応力軸方向（試料の堆積面・主応力軸の回転など）に関する研究、中間主応力に関する研究などがある。

供試体寸法に関する研究は三軸試験などでもよく行われているが、供試体寸法が結果に及ぼす影響は平面ひずみ試験でも重要である。先に示した Cornforth (1964) や市原・松沢 (1970) らは長手方向の寸法が極端に大きい供試体を用いているが、平面ひずみ条件を考える上ではこの形状は有利であるかもしれないが、試験を実施する時のことを考えると不都合な点もある。例えば、供試体を切り出して作製する場合にかなり大きな試料ブロックが必要となること、また、載荷板をとおして軸圧を載荷する場合に正確な制御・計測が難しいことなどが考えられる。Marachi *et al.* (1981) は、供試体の長さ・幅・高さを様々に変化させて供試体の形状の影響について調べているが、供試体の長さ・幅の比あるいは大きさが変わってもせん断強度は影響されないという結果を示している。また、最近では、望月・福島 (1991) も、端面摩擦軽減の処理を施した長さ×幅×高さ $8.0 \text{ cm} \times 4.3 \text{ cm} \times 8.0 \text{ cm}$ の供試体と $26.0 \text{ cm} \times 20.0 \text{ cm} \times 40.0 \text{ cm}$ の供試体について試験を行い、供試体の大きさは結果に有為な差を及ぼさないとしている。

主応力軸方向に関する研究としては、供試体作製時の構造異方性がせん断特性に及ぼす影響を扱ったものと、せん断時の主応力軸の回転がせん断特性に及ぼす影響を扱ったものとに大別される。前者については、試料堆積時の成層面と最大主応力の方向との関係が主な着眼点となっており、成層面に対して圧縮方向（最大主応力方向）のなす角度を δ とし、この δ が土の変形・強度特性に及ぼす影響を調べている。このような研究の代表的な例としては、Oda *et al.* (1978) や Tatsuoka *et al.* (1986) の研究などが挙げられる。Oda *et al.* (1978) は、水中で豊浦砂を堆積させた供試体を用いて実験を行い、 δ が変化するとせん断時の応力-ひずみ関係は大きく変化し、得られるせん断強度も大きく異なってくることを示している。また、Tatsuoka *et al.* (1986) は、空中落下法による密詰めと緩詰め供試体を用いて $0.05 \text{ kgf/cm}^2 \sim 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ の広範囲の拘束圧に対して実験を行い、やはり δ が変化すると試料の変形・強度特性が大きく異なることを示している。これらの研究の結論としては、せん断強度は $\delta = 90^\circ$ の時に最大となるが、 $\delta = 30^\circ$ 前後においてせん断強度は最小となり、その強度は三軸強度と同じかそれ以下になる可能性もあることを指

摘している。一方、後者の主応力軸の回転に関する研究については、従来より一面せん断試験や単純せん断試験、あるいはねじりせん断試験の結果を用いて多くの研究が行われてきている。Hansen (1961), Morgenstern and Tchalenko (1967), Rowe (1969) らは一面せん断試験を用いてせん断時の主応力軸方向の問題を議論し、Oda and Konishi (1974) は単純せん断試験を、Yoshimi and Oh-oka (1973) はリングせん断試験を用いてそれぞれ主応力軸の回転について考察した。この種の研究は他にも多くなされているが、特に一面せん断試験や単純せん断試験は試験装置や試験方法の問題で供試体に様な応力や変形を与えることが難しく、リングせん断試験を用いた Yoshimi and Oh-oka (1973) も試験装置の関係でリング周面の摩擦が結果に影響を及ぼすなどの問題がある。このため、Pradhan *et al.* (1988) はこれらの問題を極力抑えるために中空円筒供試体を用いたねじり単純せん断試験を行って主応力軸の回転の影響を調べている。さらにこのねじり単純試験では、せん断中の主応力の状態も知ることができるため、平面ひずみ試験との比較も直接行うことができる。この研究で Pradhan *et al.* (1988) は、ねじり単純せん断試験ではせん断の初期段階で主応力軸が大きく回転し、せん断ひずみが増大するとその変形・強度特性が平面ひずみ試験とほぼ同じになると結論づけている。

中間主応力に関する研究は、三主応力制御試験（真の三軸試験）を用いたものや、最近では中空ねじり単純せん断試験などを用いたものが数多くなされている。ここでは、圧縮によってせん断変形を与えるという点で平面ひずみ試験と共通する、三主応力制御試験を用いた Lade and Duncan (1973) の研究を取り上げる。彼らは、緩詰めと密詰め of 砂試料を用いて b 値（中間主応力係数：第2章を参照）を一定に保つ排水せん断試験を行っているが、 b 値の増大とともに応力-ひずみ関係の勾配やダイレイタンスの発生が大きくなるがピーク強度までの軸ひずみは小さくなること、せん断強度も b 値の増大とともに大きくなるが 1 に近づくとやや低下すること、などを示している。なお、 b 値と内部摩擦角の関係については Yamada and Ishihara (1979) が Lade and Duncan (1973) の研究なども併せて整理しており、この報告の中で平面ひずみ状態での破壊時の b 値は 0.25~0.40 の間にあるとしている。

以上、平面ひずみ試験やこれに関連する既往の研究を、主な文献を参考にしながら簡単に述べた。土の平面ひずみ挙動に関する研究は上述したもの以外にも多数あり、その目的は試料や試験方法の違いによるものからせん断のメカニズムに関するものまで様々である。しかしながら、これらの研究は静的せん断を扱ったものがほとんどであり、平面ひずみ状態における土の繰返し載荷挙動に関するものはほとんどないのが現状である。本研究では、平面ひずみ状態における土の静的せん断試験から非排水繰返し載荷試験までを系統的に行い、その結果をもとに土の平面ひずみ挙動全般について考察する。

1.3 研究の目的と概要

本研究では、平面ひずみ条件にある土の挙動を明らかにすることを目的としており、自動計測・自動制御可能な平面ひずみ試験システムを構築し、種々の平面ひずみ試験を行ってその変形・強度特性を調べた。また、得られた試験結果を通常よく行われている三軸試験結果とも比較し、平面ひずみ強度を推定する方法も提案した。以下に本論文の構成を示しながら、各章の内容を簡単に説明する。

第2章ではまず、平面ひずみ試験の特徴を述べる。いわゆる平面ひずみ試験は、1960年代に Cornforth らによって始められ、これまでも多くの研究者によって実施されているが、統一的な試験基準はまだない。例えば、わが国で土質試験の基準書としてよく用いられている地盤工学会：「土質試験の方法と解説」においても、供試体が基準外の三軸試験としていくらかの説明がなされているのみである。よってここでは、試験のイメージや力学試験の中での位置づけ、応力・変形条件の特性、中間主応力パラメータなどについて述べ、平面ひずみ試験の特徴について考察する。

第3章では、構築した自動計測・自動制御可能な平面ひずみ試験システムについて述べる。まず最初に、このシステムを構成する個々の装置について述べ、次に、それぞれの装置を構成するユニットや変換器について述べながら、試験システム全体の精度についても考察する。そして最後に、自動計測・自動制御を行うために作成した制御プログラムについて説明する。平面ひずみ試験はまだ規格化されていない土質試験でもあり、既製のシステムはまだ市販されていないため、いくつかの部品や装置については自作したものもある。本章では、これらについても詳細に説明する。

第4章では、用いた試料と供試体の作製方法について述べる。土質試験を行う場合、供試体の質が結果に及ぼす影響は極めて大きく、その作製方法を厳密に定めておかねばならない。本研究では砂と粘土を用いて実験を行っているが、それぞれの物理特性から供試体の作製方法までを詳しく述べる。また、試験装置と同様に、供試体作製に必要ないくつかの部品や装置も新たに作製したが、それらについても詳細に説明する。

第5章では、構築した平面ひずみ試験システムを用いて行った砂の静的せん断試験の結果をもとに、その力学特性について考察する。用いた試料は豊浦標準砂で、圧密は平面ひずみ状態であることを考えて K_0 圧密を基本としたが、三軸試験や他機関との比較のために等方圧密も行った。また、試料が砂であるため、排水せん断を基本としているが、後に行う粘土のせん断特性などとの比較も考えて非排水せん断も行った。得られた結果については、試験条件ごとの考察の他、試験条件が異なった場合にどのような力学特性の違いが生じるのかについても検討している。また、最初に等方圧密排水静的せん断の結果を他の

第2章 平面ひずみ試験

研究報告と比較することにより、構築した試験システムの信頼性についても検討を加えた。なお、著者に関係する論文・報告としては 1987-1989 を参照されたい。

第6章では、粘土の静的せん断試験を行い、その結果をもとに粘土の力学特性について考察する。用いた試料は市販のカオリン粘土で、圧密は平面ひずみ状態であることを考え、すべて K_0 圧密を行い、せん断は試料が粘土であることよりすべて非排水せん断とした。得られた結果は、三軸試験との比較はもとより、過圧密履歴の影響などについても検討している。また、砂を用いた非排水静的せん断試験の結果とも比較し、粘土の平面ひずみ挙動について詳細に考察している。なお、著者に関係する論文・報告としては 1991-1992 を参照されたい。

第7章では、飽和豊浦砂を用いた非排水繰返し載荷試験を行い、その力学特性について考察する。砂の非排水繰返し載荷挙動を考える場合、液状化強度が一つの重要な指標となるが、ここでは強度特性のみならず変形特性についても考察し、試料が液状化に至るまでの過程についても詳細に検討している。平面ひずみ条件における砂の非排水繰返し載荷試験は従来よりほとんど行われていないため、この検討は重要である。主な検討項目としては液状化強度の他に、平面ひずみ試験・三軸試験での違い、等方圧密・異方圧密の影響、軸圧・セル圧両振りの効果などがある。なお、著者に関係する論文・報告としては 1987-1989 を参照されたい。

第8章では、カオリン粘土を用いた非排水繰返し載荷試験を行い、その力学特性について考察する。粘土の場合、砂とは異なり、非排水繰返し載荷による影響は繰返し破壊のみならず繰返し載荷中や繰返し載荷後の沈下にも及ぶが、ここでは繰返し載荷中の変形・強度特性に限って考察した。砂の場合と同様に、平面ひずみ条件における粘土の非排水繰返し載荷挙動に関する研究はこれまでほとんどなされていないため、ここではかなり基本的な部分も含めて検討を加えている。主な検討項目としては、平面ひずみ条件・三軸条件における粘土の非排水繰返し載荷特性の違いや、過圧密状態も含めた非排水繰返し平面ひずみ挙動についての変形・強度特性に関する考察などがある。なお、著者に関係する論文・報告としては 1993-1995 を参照されたい。

第9章では、中間主応力係数を用いて三軸試験などの結果から平面ひずみ強度を推定する方法について述べる。本研究では、代表的な砂と粘土の試料を用いて様々な条件で平面ひずみ試験を行っているが、その結果として限界状態における中間主応力係数の値が試料や試験条件によらずほぼ同じ値になることが明らかになる。ここではまず、本研究で行った種々の平面ひずみ試験での中間主応力の挙動についてまとめ、限界状態パラメータ M と中間主応力係数 b 値を用いた平面ひずみ強度の推定式を誘導する。そして、この式を用いて計算した平面ひずみ強度を実験結果と比較し、考察する。なお、著者に関係する論文・報告としては 1992-1994 を中心に参照されたい。

2.1 概説

平面ひずみ試験は、その試験装置や試験方法などの基準化がなされておらず、現在ではまだ特殊な土質試験の部類として分類されている。土質試験の基準書として一般的によく用いられている土質工学会（現：地盤工学会）の「土質試験の方法と解説」（1990）でも、供試体が基準外の三軸試験としていくらかの説明がなされているだけである。しかし、土木や農業土木など、地盤工学の分野が対象とする現場には、フィルダムの堤体や堤防などの土構造物、あるいは連続フーチング下の基礎地盤など、平面ひずみ状態にあるものも少なくない。このような状態にある土の強度や変形特性を調べる場合、現場状態に適合した土質試験を行う必要があるが、平面ひずみ試験は現場条件を忠実に再現するという点で最も適した試験方法の一つである。さらに、斜面安定解析など、土構造物や地盤の数値解析において2次元モデル（平面ひずみ境界）が多く用いられていることを考えると、平面ひずみ試験は、これらのパラメータを決定するためにも非常に有効な試験であると考えられる。本章では、この平面ひずみ試験の特徴について考察する。

2.2 平面ひずみ試験の特徴

ここでは、平面ひずみ試験について、試験のイメージ、他の力学試験との比較、応力・変形条件の特性、中間主応力パラメータなどについて述べながら、その特徴について考察する。なお、ここでいう平面ひずみ試験とは狭義のものであり、いわゆる一般的に平面ひずみ試験と呼ばれているものである。したがって、後述するように、単純せん断試験やねじりせん断試験あるいは三主応力制御試験なども平面ひずみ条件での試験が可能であるが、これらは別の試験として取り扱うものとする。

2.2.1 平面ひずみ試験のイメージ

平面ひずみ試験のイメージを示すと図 2-01 のようになる。供試体は角柱状で、長手方

向にはひずみ拘束板があり、こちらが中間主応力の方向となる。残る2方向については、最大主応力として三軸試験などと同じように上下のキャップ・ペDESTALから圧縮応力が載荷され、最小主応力はゴムスリーブを介してセル圧として載荷される。このように、平面ひずみ試験は、角柱状の供試体を用いる点と、拘束板で側方変形を拘束して中間主応力を計測する点を除けば、基本的に三軸試験と同じ原理であると考えてよい。

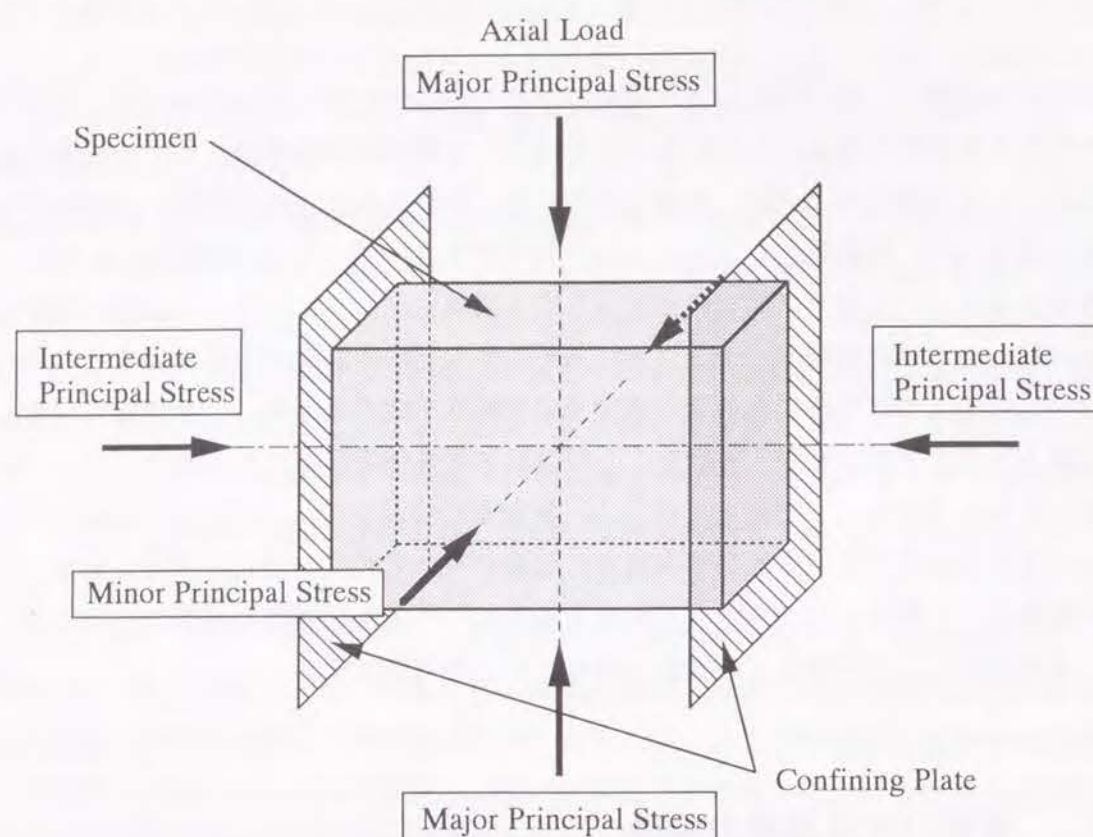


図 2-01 平面ひずみ試験のイメージ
(Image of Plane Strain Test)

平面ひずみ条件を再現するという点では、供試体はひずみ拘束方向に長いものが望まれる。しかし、あまりに横長な供試体になると、キャップ・ペDESTALによる端面での摩擦が大きくなり、また、正確な軸圧載荷や荷重計測（すなわち、供試体に接する上下面を完全に平行に保ちながら偏心のない載荷や計測を行うこと）も難しくなり、あまり好ましくない。供試体の寸法に関する研究はいくつかあり、例えば Marachi *et al.* (1981) などのように供試体の大きさが平面ひずみ試験結果に有意な影響を及ぼさないという報告がある一方で、例えば龍岡ら (1984) のように強度・変形特性が高さと幅の比に影響を受けるといふ報告もある。一般的にみると、供試体は、高さ (H) と幅 (W) の比が $W/H = 1.0 \sim 1.5$ 程度、高さ (H) と奥行き (D) の比が $H/D = 2.0$ 程度のものが従来より良好な結果を得られているようである。

2.2.2 土質力学試験の種類と特徴

土質試験、その中でも土の力学的な強度や変形特性を調べるのに用いられるせん断試験には、対象とする土の性質や現場での変形条件によって様々なものがある。一般的によく行われているものには、一軸圧縮試験、軸対称三軸試験、平面ひずみ試験、三主応力制御試験、一面せん断試験、単純せん断試験、中空ねじり試験、ペーンせん断試験などがあるが、ここではこれらの試験の特徴を簡単に述べる。

(1) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は、自立する土の圧縮強度を求める試験で、次に述べる三軸圧縮試験において、拘束圧をゼロとした試験に相当する。排水条件を厳密に制御できないが、比較的急速にせん断を行う（せん断速度は $1\% / \text{min}$: 土質試験の方法と解説 (1990) 参照）ので、ほぼ非排水条件での圧縮（せん断）強度が得られる。試験装置や試験方法の簡便さなどから実用的によく行われており、原位置の地盤強さを求めるのに広く用いられている。

(2) 軸対称三軸試験

いわゆる三軸試験と呼ばれている軸対称三軸試験は、拘束圧の存在する状態での土の強度を求める試験であり、比較的古くから行われているためデータの蓄積も多い。軸対称状態 ($\sigma_2' = \sigma_3'$) として水平地盤内の変形状態を再現でき、土の変形・強度定数が得られるだけでなく、要素試験として構成則の研究にもよく用いられている。また、一軸圧縮試験とは異なり伸張試験が行えるほか、液状化試験や圧密試験などにも適用できという特徴もある。土質試験としては比較的行いやすく得られる結果の精度も高いが、軸対称状態のみに対応しており、主応力軸も載荷方向のみに固定される。

(3) 三主応力制御試験

三主応力制御試験は、立方体または直方体（角柱）供試体を用いて異なる3主応力方向の載荷を可能とした試験である。軸対称三軸試験に対して真の三軸試験とも呼ばれ、異なる3主応力が制御・測定できるという大きな特長がある。よって、中間主応力が直接制御できること、あるいは、供試体の初期構造の異方性の影響が考慮できることなど、構成則を構築する際には非常に有利な試験である。試験機のタイプには、大別して剛板載荷型とゴム袋載荷型の2種類があるが、試験装置が複雑である上、隣接する載荷版またはゴム袋の隅角部における相互干渉問題（コーナー・エフェクトと呼ばれる：この部分の応力・ひずみ分布が不均一になる）などの問題点もある。この試験を用いた研究としては Ko and Scott (1967), Green and Bishop (1969), Lade and Duncan (1973) などがある。

(4) 平面ひずみ試験

平面ひずみ試験は、本研究において中心的な役割を果たすものである。平面ひずみ状態にある土の挙動を調べるには最も適した試験の一つであり、異なる3主応力が測定できる割に試験装置や試験方法などは比較的簡単である。ただし、主応力軸が軸圧載荷方向である最大主応力方向のみに固定されること、伸張試験が不可能なことなど、短所もいくつか存在する。この試験は、上述の三主応力制御試験において中間主応力方向の変形を固定したもの、あるいは、荷重計を有する拘束枠によって長手方向の変形を拘束した三軸試験とみなすこともできる。

(5) 一面せん断試験

一面せん断試験は、土をある特定の断面で強制的にせん断させる試験であり、直接せん断試験とも呼ばれている。試験装置や試験方法が簡単であり試験の意義も明確であるが、せん断面が供試体の構造的弱面に無関係であることや、供試体内部のひずみや応力状態が一様でないなどの欠点もある。また、供試体からの排水制御や間隙水圧の測定が難しく、これを可能にするための工夫・研究も多くなされている。この試験に関する文献は古くは Skempton and Bishop (1950) や Taylor (1952) などに遡るが、最近では三笠 (1960) の改良型試験機などが有名である。

(6) 単純せん断試験

単純せん断試験は、土に一樣なせん断変形を与えてその力学特性を求めようとする試験である。一面せん断試験とは異なり、純粋なせん断変形に対する土の挙動を調べることが可能であり、せん断ひずみとせん断応力が直接求まる。代表的な試験装置としてNGI型 (Bjerrum and Landva (1966) 参照) とケンブリッジ型 (Roscoe (1953) 参照) があるが、前者では一樣なせん断変形を与えることが難しく、また後者では応力分布が不均一になるなどの問題もある。なお、広義ではこの試験も平面ひずみ試験の一つと考えることができる。いくつかの欠点もあるが、平面ひずみ試験とは異なり、主応力軸の回転が可能であることは大きな特長でもある。

(7) ねじりせん断試験

ねじりせん断試験は、広い意味では単純せん断試験の一つと考えることができる。試験では供試体内の応力やひずみの分布を一樣にするため、中空円筒形の供試体を使う場合が多く、中空ねじりせん断試験として行われることが多い。試験装置や制御の方法は複雑であるが、単純せん断による主応力軸の回転が可能であるほか、軸圧や側圧の制御も可能であることがこの試験の大きな長所である。異なる3主応力状態が計測でき、円周方向のひずみが拘束できるため平面ひずみ試験としての役割も果たす。したがって、地震時のおけ

る土構造物の液状化試験など、平面ひずみ条件で主応力軸が回転する状態を再現した試験として、この試験を用いた研究が近年多く行われるようになってきている。

この試験は、古くは上述の単純せん断試験の短所を補う (供試体がせん断方向に端面を有さない) 目的で開発されたリングせん断試験に端を発するとも考えられ、文献としては Bishop *et al.* (1971) や Yoshimi and Oh-oka (1973) などがある。中空ねじりせん断試験として行われるようになった文献としては、Saada and Baah (1967)、Lade (最近では 1981)、Tatsuoka *et al.* (1986) などがある。

(8) ペーンせん断試験

ペーンせん断試験は、サンプリングや供試体成形が不可能な、比較的軟弱な粘性土の強度を求める場合に行われる試験である。十字状に取り付けられた長方形の羽根を、粘性土中に押し込んで回転させ、その回転角とトルクを測定する。試験の方法から考えて原位置試験に向いているが、室内試験としても行われることもある。なお、この試験は要素試験ではなく、境界値問題の一種であることも付け加えておく。

2.2.3 三軸試験との比較

いわゆる三軸試験 (すなわち軸対称三軸圧縮試験) は、土の力学特性を調べる土質試験のなかでは最もよく行われるものの一つである。三軸試験は、一軸圧縮試験や一面せん断試験に比べると用いる装置や試験方法は複雑であるが、供試体内の応力やひずみの分布が均一であり、精度の高い試験データが得られる。また、排水条件も正確にコントロールでき、せん断開始時における供試体条件を圧密によって様々に変化させることができるのも大きな特長である。その一方で、せん断中の主応力軸が固定されること、変形や応力状態が軸対称条件であることなど、装置の機構上の制約条件もいくつか存在する。したがって、純粋なせん断変形による土の力学特性を調べるには、単純せん断試験やねじりせん断試験などを行う必要がある。

平面ひずみ試験は、一般的によく行われている土質試験の中では、三軸圧縮試験に比較的近い特徴をもっていると考えられる。つまり、せん断中の応力・変形条件は異なるが、どちらも軸方向への圧縮によって土のせん断強度を求める試験であり、せん断に先立つ圧密によって試料の拘束条件をいろいろに変化させることができる。一軸圧縮試験や一面せん断試験に比べると、供試体内の応力やひずみの分布は均一であり、排水条件も正確にコントロールできる。また、単純せん断試験などと比べると、主応力軸の回転は不可能であり、純粋なせん断変形を与えられない点も三軸圧縮試験と共通した制約条件である。試験

装置を考えた場合にも、平面ひずみ試験と三軸圧縮試験は共通する部分が多い。本研究で用いた試験システムが平面ひずみ試験・三軸圧縮試験両用のものであることから、その共通性は推測できる。両試験で異なる点を挙げれば、用いる供試体形状の違いからキャップやペDESTALの形状が異なる点と、平面ひずみ試験では側方へのひずみを拘束する拘束板と中間主応力を測定する荷重計（両者をあわせて拘束枠と呼ぶ）がある点ぐらいであり、これ以外についてはほぼ同じであると言ってよい。すなわち、用いるセルは全く同じであり、試験時に制御する（制御可能である）のは軸圧とセル圧のみで、計測項目である軸圧・軸変位・間隙水圧・セル圧・排水量についても同じシステムを用いている。平面ひずみ試験と軸対称三軸圧縮試験について、主な特徴を比較すると表 2-01 のようになる。

表 2-01 平面ひずみ試験と軸対称三軸試験の特徴の比較

項 目	軸対称三軸試験	平面ひずみ試験
供試体形状	円柱形	角柱形
圧密状態	等方 & 異方圧密が可能	異方（K _o 圧密が本質的）
せん断中の 応力状態	軸対称状態 $\sigma_1' \geq \sigma_2' = \sigma_3'$	三主応力状態 $\sigma_1' \geq \sigma_2' \geq \sigma_3'$
主応力方向	0°（伸張時試験は 90°）	0°（通常、伸張試験は不可）
変形状態	軸対称状態	平面ひずみ状態

2.2.4 応力・変形条件の特性

平面ひずみ条件では、基本的に $\sigma_1' > \sigma_2' > \sigma_3'$ の異なる三主応力状態で、 σ_1' は軸圧荷方向、 σ_2' はひずみ拘束方向、 σ_3' は側圧のみが荷重される方向、となる。よって、軸対称条件のような「 $\sigma_2' = \sigma_3'$ 」の状態を再現することも不可能ではないが、K_o圧密など、限定された条件でのみ許される。また、用いる試験装置の機構上の制約から、平面ひずみ状態としての変形条件を満足させるため、供試体がセットされた直後の段階から側方の一方向が完全に固定（すなわち $\varepsilon_2 = 0$ ）されなければならない。よって、等方圧密を行う場合や伸張試験を行う場合などのように、側圧のみが増大するような状態を再現できないことになる（ただし、負圧によって側圧などを荷重する場合を除く）。これらの条件を考慮すると、平面ひずみ試験で再現可能な供試体の応力・ひずみ条件は、図

2-02 に示すような範囲となる。すなわち、供試体をK_o圧密をした場合の径路を境界にして、応力条件としては「偏差応力 > 平均有効主応力」を満足する範囲が、ひずみ条件としては「偏差ひずみ > 体積ひずみ」を満足する範囲がそれぞれ平面ひずみ試験で再現可能な状態である。

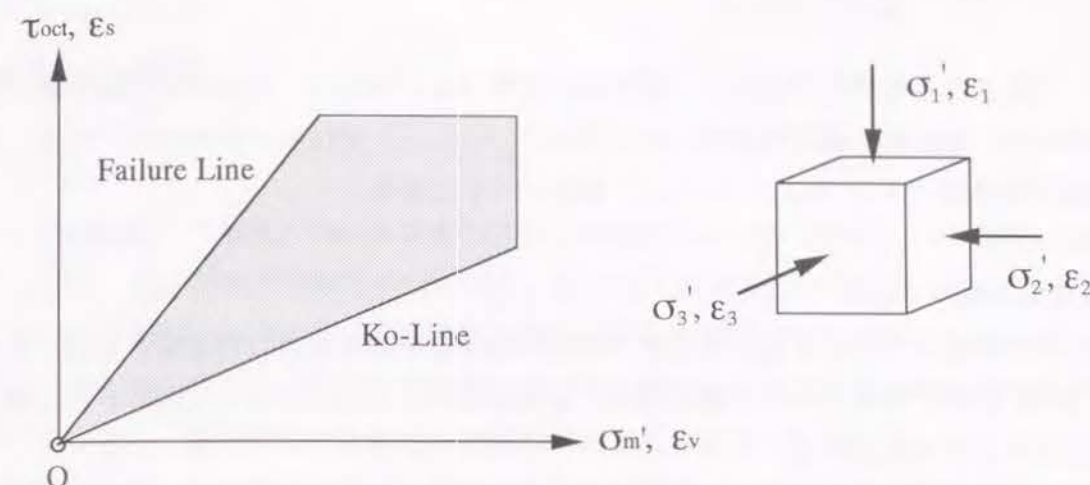


図 2-02 平面ひずみ試験で再現可能な応力・ひずみ条件
(Stress and Strain Conditions in Plane Strain Test)

なお、供試体の応力・変形条件は用いる試験装置や試験方法によって大きく異なるが、平面ひずみ試験は、前述のように試験に関する基準化がまだなされていない。これらの特性は、最も単純な平面ひずみ試験機の構造である、ひずみ拘束用の拘束板が固定されているもの（中間主応力方向には動かない）のみを考えている。したがって、三主応力制御型の試験機など、ひずみ拘束板が可動である装置を用いれば、等方圧密後に平面ひずみせん断を行うことも可能となる。

2.2.5 中間主応力の評価パラメータ

本章でもたびたび述べてきたように、平面ひずみ状態を考える場合、中間主応力の挙動は一つの重要なポイントになる。ここでは、中間主応力の挙動を評価する際によく用いられるパラメータとして、中間主応力係数 b 値と中間主応力角 θ について若干の説明をしておく。なお、これらのパラメータの幾何学的な意味を π 平面上に示した（図 2-03）。

(1) 中間主応力係数： b 値

中間主応力係数の b 値とは、異方応力状態における中間主応力の発現割合を表すもので

あり、最小主応力に対する中間主応力と最大主応力の偏差成分の比として定義される。具体的には、3主応力 σ_1' , σ_2' , σ_3' に対して次式のように表される。

$$b = \frac{(\sigma_2' - \sigma_3')}{(\sigma_1' - \sigma_3')} \quad (2-01)$$

よって、この式からも明かであるが、等方応力状態($\sigma_1' = \sigma_2' = \sigma_3'$)ではb値は定義できないが、軸対称三軸圧縮状態($\sigma_1' > \sigma_2' = \sigma_3'$)では $b = 0$ となり、反対に軸対称三軸伸張状態($\sigma_1' = \sigma_2' > \sigma_3'$)では $b = 1$ となる。

(2) 中間主応力角： θ

中間主応力角の θ についても、異方応力状態における中間主応力の発現割合を表すもので、図 2-03 に示す角度として定義される。3主応力 σ_1' , σ_2' , σ_3' を用いると、数式的には次式のように表される。

$$\theta = \arctan \left\{ \frac{\sqrt{3} \times (\sigma_2' - \sigma_3')}{(\sigma_1' - \sigma_2') + (\sigma_1' - \sigma_3')} \right\} \quad (2-02)$$

図 2-03 から明かであるが、軸対称三軸圧縮状態($\sigma_1' > \sigma_2' = \sigma_3'$)では $\theta = 0^\circ$ となり、反対に軸対称三軸伸張状態($\sigma_1' = \sigma_2' > \sigma_3'$)では $\theta = 60^\circ$ となる。

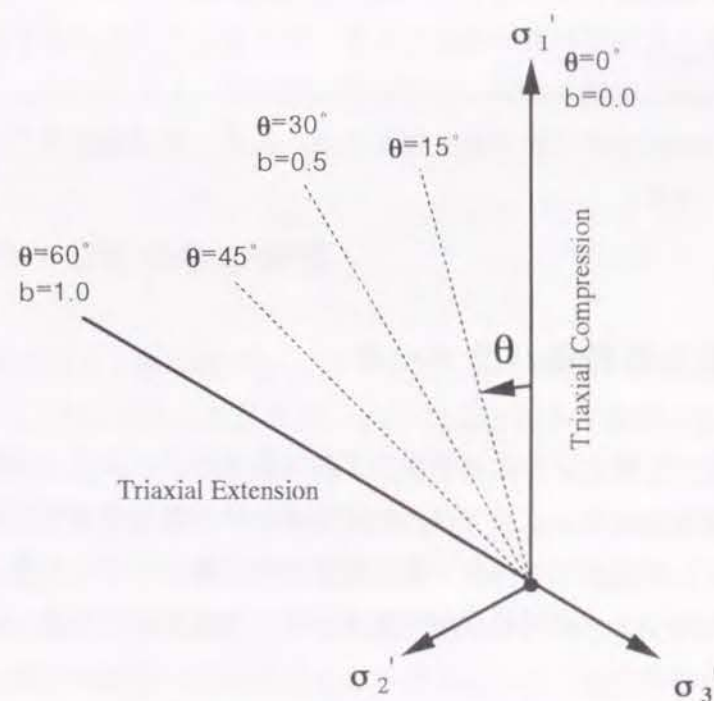


図 2-03 中間主応力係数の幾何学的意味
(Geometrical Meaning of Intermediate Principal Stress Parameters)

第3章 自動計測・自動制御 平面ひずみ試験システム

3.1 概説

土質試験を行う場合、用いる試験システムの信頼性は重要である。いくら精密な試験を行っても、試験装置の信頼性がない場合、得られる試験結果の信頼性も失われてしまう。また、土質試験においては、試験方法の選定も重要な問題である。調べようとする力学特性が的確に得られるような方法や手順に従って試験を行わなければ、時間の無駄が生じるばかりでなく、得られる試験結果の信頼性にまで影響を及ぼしかねない。

本研究では、新たな平面ひずみ試験システムを構築し、種々の条件の下で平面ひずみ試験を行った。よってここでは、構築した自動計測・自動制御可能な平面ひずみ試験システムについて説明する。まず最初に、この試験システムの概要を示すとともに、精度や信頼性の向上のために考慮したいいくつかのポイントを簡潔にまとめる。次に、このシステムを構成する個々の装置について、それらの特徴を挙げながら詳しく説明する。そして、それぞれの装置を構成しているユニットや変換器について、選定のポイントや精度・特徴について述べながら、試験システム全体についての精度についても考察する。そして最後に、自動計測・自動制御を行うために作成したパソコン用のプログラムについて説明する。

3.2 試験システムの概要・特長

ここではまず最初に、構築した平面ひずみシステムの概要を示しながら、この試験システムの特徴を説明する。この試験システムは、基本的には電気・油圧サーボ式の振動三軸試験機を改良したものであるが、三軸セルの部分を根本的に平面ひずみ試験用のものに入れ替え、計測・制御用のコンピュータ(パソコン)も新しいものと交換している。したがって、軸圧や軸変位の動力源として電気・油圧サーボシステムを利用する点と、これに付属しているひずみアンプ(出力範囲も広く直線性も高い)をそのまま用いた点を除けば、ほとんど別の試験システムに仕上がっていると考えてよい。構築した平面ひずみ試験システムの概要を図 3-01 に示したが、この試験システムの特長としては、次のようなものがある。

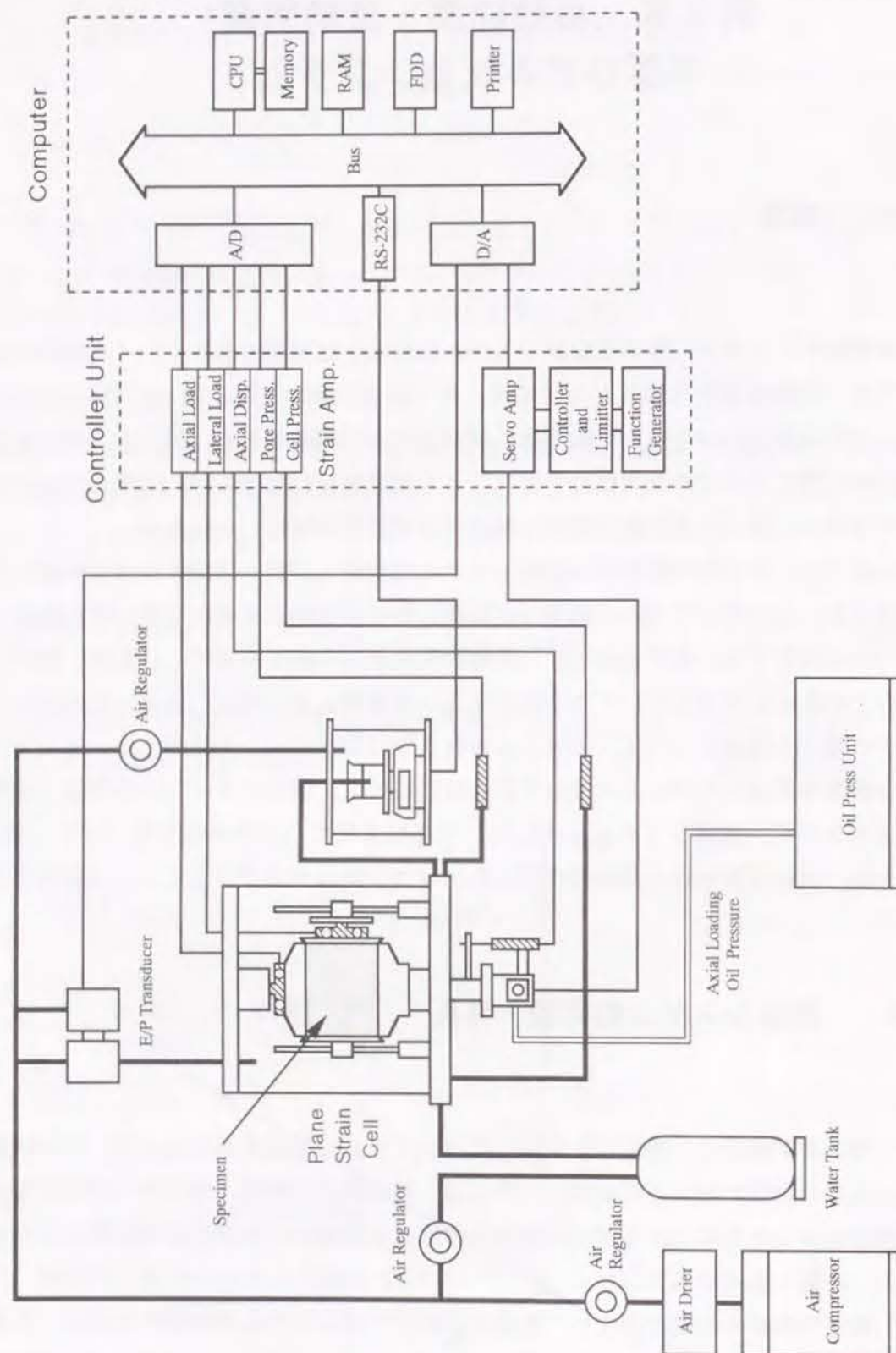


図 3-01 平面ひずみ試験システムの概要
(Diagram of Plane Strain Testing System)

- a) 軸圧・軸変位の制御には油圧（電気・油圧サーボ）を用いており、1 Hz より短い周期の動的载荷にも追従できる。
- b) セル圧の制御には圧縮空気（高精度減圧バルブ、または E/P 変換器により調節）を用いており、装置や制御方法が簡単である。
- c) 試験機の制御やデータの計測・解析はすべてパソコンにより自動化しているため、計測や制御精度が向上するとともに、任意の応力経路で試験が行える。
- d) パソコンに接続する A/D 変換器は DMA 対応 16bit 分解能の差動型のものを使用し、高精度のサンプリングが行えるとともに、ノイズなどの影響も抑えるようにしている。
- e) キャップやペデスタルを交換すれば、同じセルを用いて三軸試験を行うことも可能である。したがって、平面ひずみ試験と三軸試験の比較を行う際、用いる試験機の違いによるシステム誤差の心配はない。
- f) 側方拘束板はフローティング・タイプで、軸圧载荷（鉛直）方向にのみ可動である。したがって、拘束板による摩擦の影響は、固定された場合に比べてより均一化される。
- g) 主応力载荷方向、および、ひずみ拘束方向の応力測定は、自作した高精度小型ロードセルを平面ひずみセル内に設置しており、ピストンの摩擦などの影響は受けない。これは、繰返し载荷試験などを行う場合に重要である。
- h) 供試体の体積変化は、供試体からの排水重量を直接電子天秤で計測することにより、読み取り誤差をなくし、測定精度の向上を図っている。
- i) 配管系統はすべてシンプレックス・チューブとボール型バルブを用い、これらによる体積変化誤差をできるだけ少なくするように配慮した。

なお、装置はすべて恒温室（室温：約20℃、湿度：60%）内に設置されており、温度・湿度による影響はない。図 3-02 には試験システム全体の写真を示す。



図 3-02 試験システム (Overview of Testing System)

3.3 試験装置

ここでは、構築した平面ひずみ試験システムを、平面ひずみセル・载荷装置・体積変化測定用セルの3つに分け、それぞれの特徴や仕組みを説明する。

3.3.1 平面ひずみセル

図 3-03 に平面ひずみセルを示す（ただしこの図では、見やすさのためパイプ類は省略してある）。これは、以前より三軸試験機として用いていた装置のセル部分を改良したもので、セルの内径は約 20cm、供試体の寸法は 高さ7cm × 幅9cm × 奥行き3cm である。

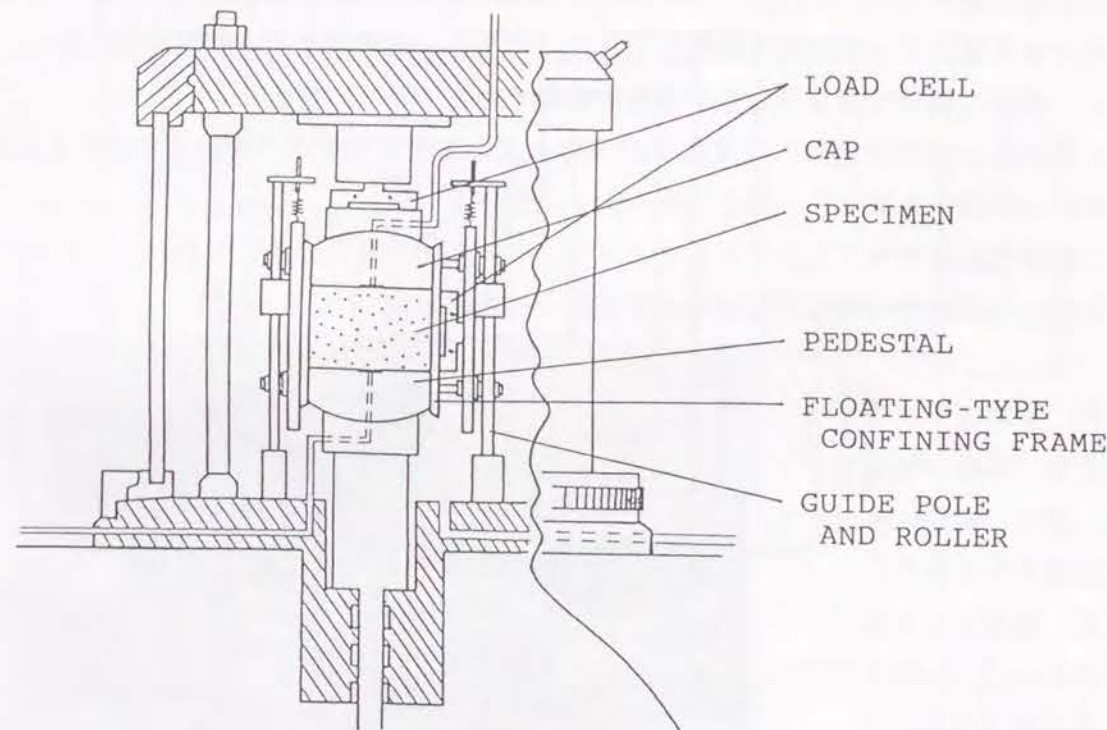


図 3-03 平面ひずみセル
(Diagram of Plane Strain Cell)

このセルの特長として、前述のように、キャップやペDESTALを交換すれば三軸試験を行うことも可能であり、平面ひずみ条件と三軸条件での挙動の違いを調べる際に試験装置の違いによる影響を考慮する必要がない点が挙げられる。また、自作した小型のロードセ

ルを平面ひずみセル内に直接設置（キャップと拘束板の部分）しているため、载荷ロッドの摩擦による荷重値の測定誤差は生じない。さらに、平面ひずみ条件のための拘束枠はフローティング・タイプであり、拘束枠が固定された場合と比べると、壁面摩擦力の分布がより均一化される。なお、動力源として電気・油圧サーボを用いているため、キャップは固定でありペDESTAL側が稼働する。したがって、载荷はペDESTALによって下方から行われ、供試体を通した後にキャップの部分で軸方向力を測定するようになっている。

3.3.2 载荷装置

図 3-04 に軸圧駆動系統の概略を示した。ここには、室外に備えられた油圧ポンプから一定の油圧（約 7000 kPa）が供給され、サーボ弁を介してアクチュエータ部にオイルが伝達され、ペDESTALが上下に稼働できるようになっている。

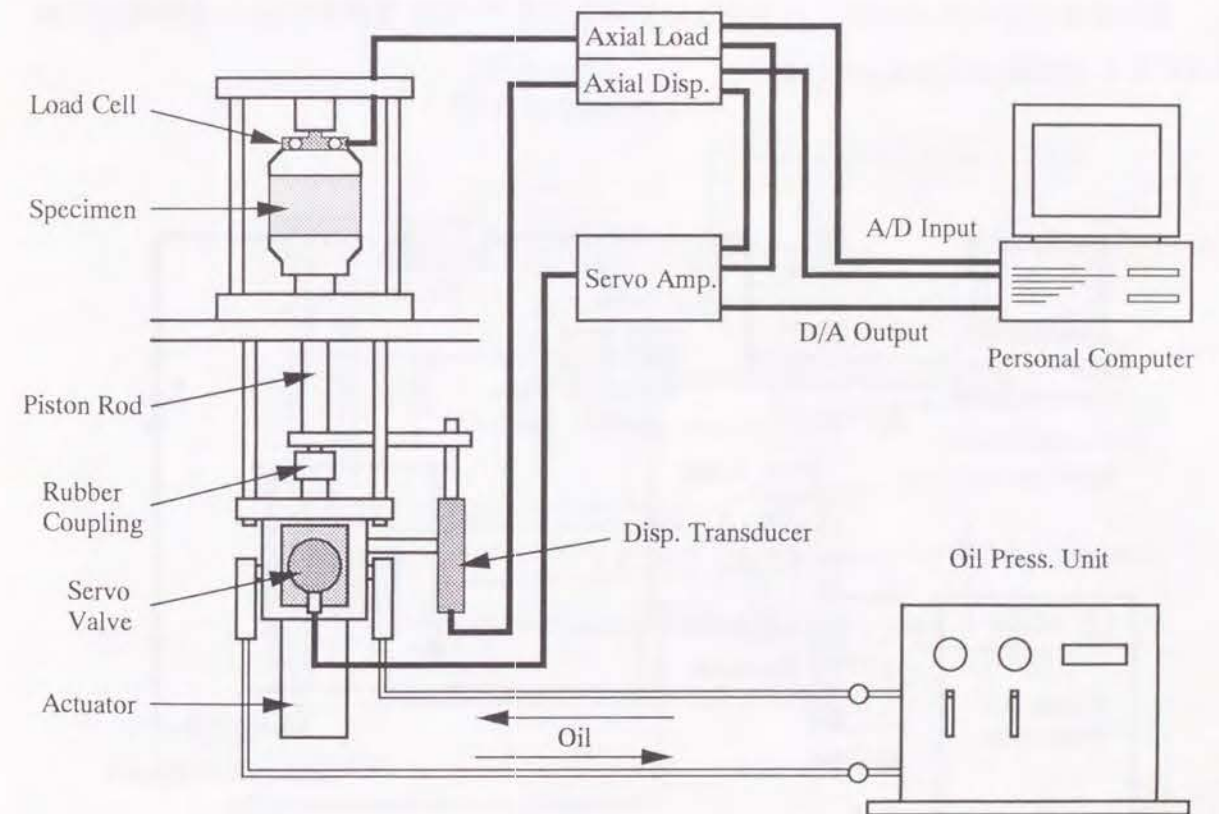


図 3-04 軸圧駆動系統
(Axial Compression Unit)

出力となる軸圧や軸変位はそれぞれロードセルや変位計で計測されるが、この信号は直接サーボアンプにも送られ、サーボ出力の制御に使用される。これら油圧サーボ全体の制御は、サーボアンプを含むコントローラによって行われる。また、サーボアンプには、パソコンに組み込まれた D/A 変換器からの出力がバイアス電圧として入力され、軸圧の出力を任意の大きさに制御できるようになっている。

本試験機で油圧サーボを使用するのは、軸圧（軸変位）方向のみである。セル圧も水シリンダを用いて油圧サーボで制御できるが、本研究では E/P 変換器（電気／空圧変換器）により空気圧でセル圧を制御した。これは、それほど俊敏なセル圧制御を必要とせず、また、油圧を軸圧方向のみに使用することによってより正確に軸圧を制御できるようにすること、などの理由による。

図 3-05 にはセル圧制御システムの概略を示した。用いた E/P 変換器は Bellofram 社のもの（E/P Transducer: T-1000）で、ポリウムブースター（同 Type 20）を併用することによりセル圧制御に遅れが生じないように配慮した。これらに供給される圧縮空気は、オイルレス・低騒音のコンプレッサで作られるが、空気中に含まれる水分をドライヤーによって除去し、さらに大容量レギュレータで一定圧（約 600 kPa）に減圧したものを用いた。なお、E/P 変換器からの出力は、パソコンに組み込まれた D/A 変換器により直接電圧で制御されるようになっている。

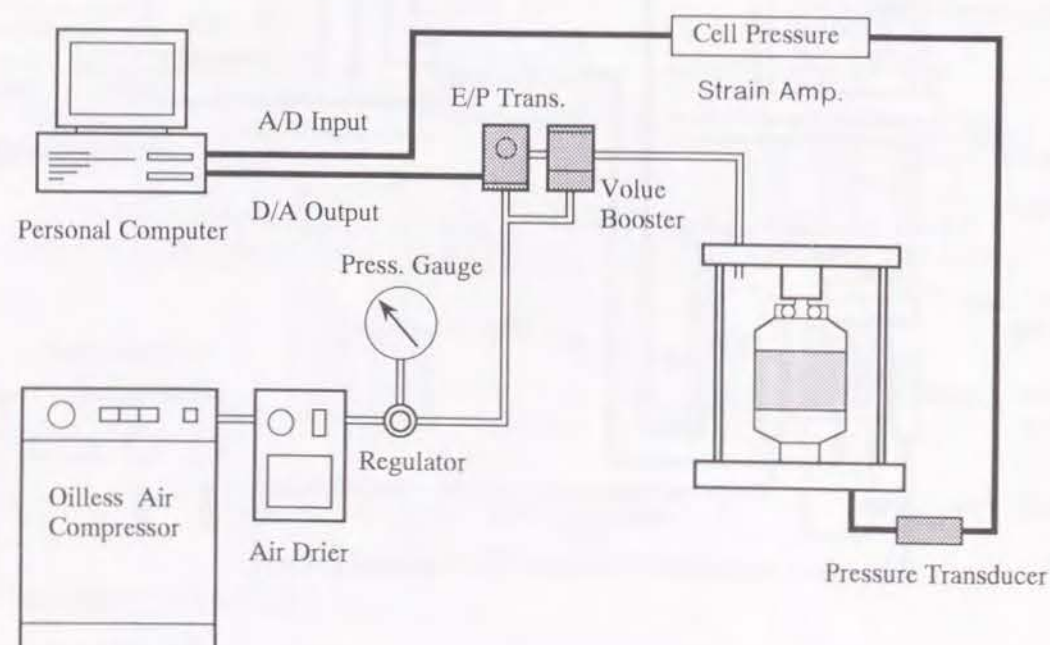


図 3-05 セル圧制御系統
(Cell Pressure Control System)

3.3.3 体積変化測定用セル

一般に、体積変化の測定には二重管ピュレットを用いてその水位変動を微小差圧計で読みとることが多いが、この方式は水位変動によるメニスカス誤差が避けられないため、本研究ではピーカーを用いてその重量変化を直接測定することにした。

図 3-06 に体積変化測定用セルの概略を示した。これは、外径30cm、内径28cmの透明アクリル円筒の上下をアルミ板で密閉（Oリングによってシールしてある）したもので、供試体の体積変化を測定するとともに、セル内には背圧も載荷できるようになっている。中には 1/100 g まで測定可能な電子天秤（A770 D 社製：EK-120A）が入っており、電子天秤の上に載ったピーカーには供試体からの排水が自由に流入・流出できるようになっている。この電子天秤には RS-232C のインタフェースをオプションで取り付け、測定された重量をリアルタイムで出力し、これをパソコンで読み取って供試体の体積変化が計算できるようになっている。なお、ピーカー内の水には、蒸発防止のため、上にオリーブ油を薄くはってある。また、この電子天秤は、背圧の影響を受けて計測値が変動しないことも確認している。

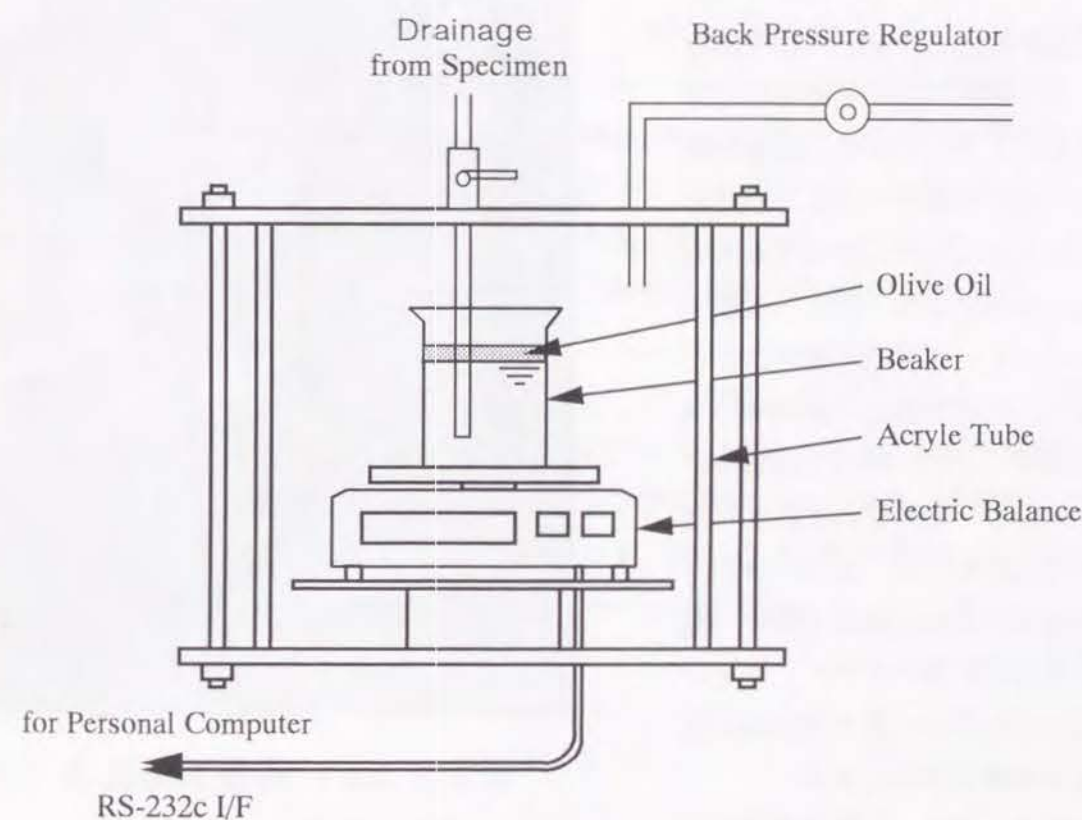


図 3-06 体積変化測定用セル
(Volume Change Measuring Cell)

3.4 計測・制御システム

ここでは、本研究で用いた平面ひずみシステムを構成する計測・制御システムの部分について、その特徴などの詳細を説明する。

3.4.1 コントローラ・ユニット

図 3-07 にコントローラ・ユニットの写真を示した。このユニットにはコントローラ本体の他に、サーボアンプ、ファンクションジェネレータ、リミッタ、ストレインアンプが組み込まれている。

コントローラは、サーボアンプからの入力をもとに、軸圧や軸変位を監視したり調整したりするものである。このコントローラは、荷重制御モードと変位制御モードをもっており、どちらのモードにおいても出力を任意に制御できる。また、試験中にこれらのモードを切り替えることも可能で、圧密や繰返し荷重時には荷重制御モードに、静的せん断時には変位制御モードにそれぞれ切り替えてから試験を行う。また、コントローラには外部からの制御信号（電圧）を入力する端子もあり、ファンクションジェネレータやパソコンなどによる制御も可能である。

サーボアンプは、各種変換器からのフィードバック信号をもとにサーボ弁を制御するものである。増幅率やゼロ点の調整の他、ディザ量の調節も可能である。



図 3-07 コントローラ・ユニット
(Diagram of Controller Unit)

ファンクションジェネレータは、正弦波、矩形波、ノコギリ波などの電圧信号を任意の振幅や周波数で出力するものである。したがって、パソコンを用いなくても動的荷重試験が可能になるが、コントローラが荷重か変位の制御しかできないため、応力制御による荷重は行えない。本研究では応力制御の正弦波を必要とするため、波形の制御はすべてパソコンで行うこととした。

リミッタは、変位、荷重、セル圧などの過負荷から試験装置を守るものである。設定された値以上の出力を感知した場合、動力源である油圧ポンプの電源が自動的に切断される。

ストレインアンプは、各種のひずみゲージ式変換器の出力を増幅するものであり、制御には直接関係ない。このシステムでは、サーボアンプに入力されるロードセルや変位計からのフィードバックもこのアンプで一旦増幅するため、同じユニットに組み込んでいる。

3.4.2 パソコン

用いたパソコンは NEC 社製の PC-9801 vm（今となってはかなり古く感じられるが、当時としては最新鋭のものであった）であり、自動化の中心的役割を果たすものである。拡張スロットには増設メモリの他に A/D 変換・D/A 変換の各ボードを追加しており、RS-232C やプリンタ用のパラレルなどのインタフェースはあらかじめ組み込まれている。

A/D 変換ボードは CANOUPS 社の ANALOG PRO DMA を用いたが、DMA 機能を持ち、クロックも内蔵している。入力は差動で最大 8チャンネル（すべて BNC コネクタ）可能であり、分解能は 16 ビット、サンプリング周波数は最高 1MHz まで対応している。また、サンプリングの開始・終了や内蔵クロックの制御を含め、ボードの操作はすべてプログラムで行えるため、自動化が可能である。

D/A 変換ボードは CONTEC 社の DA12-4(98) で、個別に 4チャンネルの出力ができ、分解能は 12 ビットである。クロックは内蔵されていないため、パソコンに内蔵されているクロックを利用するか、サンプリングのタイミングに連動させ、A/D 変換ボードに内蔵されているクロックを利用することになる。なお、出力の大きさや開始・終了などボードの操作は A/D 変換ボードと同様にすべてプログラムで行える。

3.4.3 各種変換器

この試験システムで使用した計測器具（変換器）は、次のようなものである。以下にその種類と出力性能などを示す。

(1) 変位計（軸方向変位測定用）

共和電業：YA1996

容量：50 mm

出力：3166 μ

なお、検定・キャリブレーションについては、メーカー側の行ったテストの資料をそのまま用いた。

(2) ロードセル（軸方向荷重測定用）

自作品（門型：りん青銅製）

容量：300 kgf

出力：3393 μ

なお、検定・キャリブレーションについては、製作方法とともに後で述べる。

(3) ロードセル（ひずみ拘束方向荷重測定用）

自作品（門型：りん青銅製）

容量：300 kgf

出力：3138 μ

なお、検定・キャリブレーションについては、製作方法とともに後で述べる。

(4) 水圧計（供試体内間隙水圧測定用）

共和電業：YK2917

容量：10 kgf/cm²

出力：3983 μ

なお、検定・キャリブレーションについては、基本的にはメーカー側の行ったテストの資料をそのまま用いたが、定期的に精密ブルドンゲージにより較正值の確認も行った。

(5) 水圧計（側圧測定用）

共和電業：YK0899

容量：10 kgf/cm²

出力：4005 μ

なお、検定・キャリブレーションについては、基本的にはメーカー側の行ったテストの資料をそのまま用いたが、定期的に精密ブルドンゲージにより較正值の確認も行った。

(6) 電子天秤（体積変化（供試体排水量）測定用）

A7ND D：EK120A

容量：120 g

分解能：1/100 g

なお、性能などについてはメーカー側の資料をそのまま用いたが、定期的にキャリ

ブレーションを行い、出力をチェックした。キャリブレーション方法は、100g の標準分銅により 0(g) と 100(g) の出力を調整するものである。

3.4.4 ロードセルの製作と検定

用いたロードセルは図 3-08 に示すような門型形状で、龍岡らの文献(1983)を参考に多少の改良も加えた。基本的には図のように、局所的に断面二次モーメントが非常に小さくなる部分（円柱状孔付近）にひずみゲージを4枚貼り付け、ホイートストン・ブリッジ回路が組まれるよう配線した。

ロードセルの性能は計測精度に直接かかわってくるため、かなりの高精度が要求される一方で、本試験装置では構造上の理由から、その小型化と防水・耐水性もあわせて要求される。精度の点は、ひずみゲージをロードセルの円筒孔の境界線の内側に、かつ、ロードセルの中心線上に正確に貼り付けることでほとんど解決できる。また、防水・耐水性に関しては、ひずみゲージ貼り付け部分全体を絶縁性の防水シリコンゴムで固めることで満足させた。実際には、ひずみゲージ本体やそのリード線、ひずみアンプへつながるシールドケーブルへの接続部分全体をシリコンゴムでコートした。また、使用中に防水性が最も低下すると考えられるシールドケーブルへの接続部は、ロードセルの脚部に固定用の金具を取り付け、シールドケーブルの端を完全に固定した。ロードセル作製の具体的な手順を以下に示す。

1) ロードセルのひずみゲージ貼り付け面を細かいサンドペーパーで磨き、さらに付着した油分などの汚れをアセトンで拭いておく。

2) ひずみゲージ貼り付け位置を先の尖ったエンピツ（2Hなど）で正確にけがく。

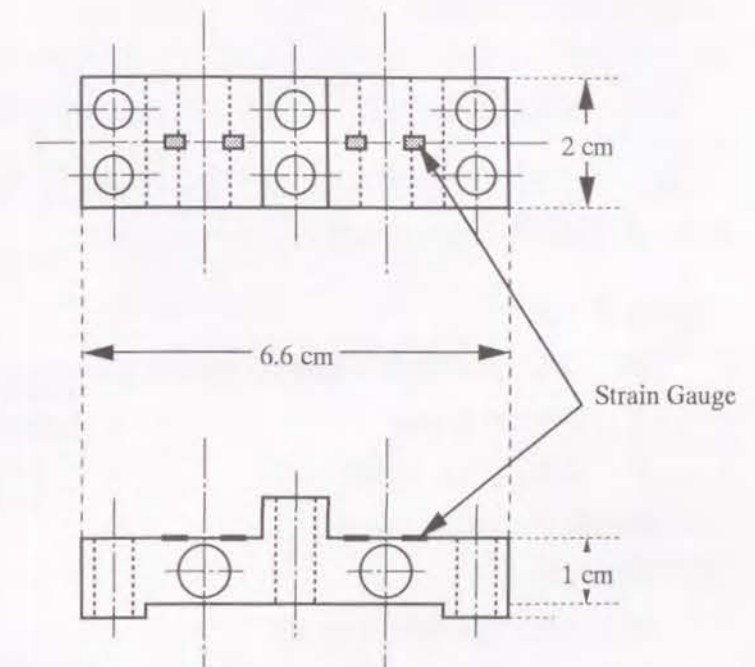


図 3-08 ロードセルの形状
(Diagram of Load Cell)

- 3) ひずみゲージにゲージ貼付剤を均一に薄く塗り、ロードセルに正確に貼り付ける。
- 4) 貼り付けたひずみゲージをテフロンテープで保護し、クランプなどではさんで所定の荷重で押さえつけながら電気炉に入れて貼付剤を硬化させる。
- 5) 電気炉から取り出し常温に戻してから接着剤で結線のための端子を付け、リード線やシールドケーブルの配線を行う。
- 6) シールドケーブル固定用金具を取り付け、ケーブルを固定する。
- 7) ひずみゲージ貼付面やリード線・端子の周辺にシリコンゴムの付着力を高めるための表面処理剤を塗布する。
- 8) ひずみゲージからリード線、端子、シールドケーブルへ至る部分全体をシリコンゴムで固め、保護のためさらにシリコンゴムをエポキシ系樹脂（アラルダイド）などで覆う。

なお、ここで用いたひずみゲージ、ゲージ貼付剤、表面処理剤、シリコンゴムについてのデータ（製品名など）は以下のとおりである。

ひずみゲージ

品 名：共和電業（KFR-05-350-C1-16）

ゲージ長：0.5 mm

ゲージ率：2.13 ± 1%

抵抗値：350.0 ± 0.6Ω

ゲージ貼付剤

品 名：共和電業（PC-6）

フェノール系、加熱硬化型

表面処理剤

品 名：信越化学（プライマー FA, プライマー FB）

混合型

シリコンゴム

品 名：信越化学（シーラント KS-36G）

エレクトロニクス用（常温硬化型）

自作のロードセルについては、検定が必要である。検定の方法はいくつか考えられるが、より高精度をめざすため、てこを利用した検定装置を新たに制作した。その際、できるだけ実際に近い状態で検定が行えるよう、てこは直接平面ひずみセルに取り付けられるようなものとし、出力の測定も実際の試験と同じ装置・接続で行った。装置の概略を図 3-09 に示すが、このてこを設計する際に特に注意した点を挙げると次の様な点がある。

- a) 支点・力点・作用点がすべて同一水平面上にくるようにする。
- b) 天秤は、軽くて剛性の高いものにする（実際には、中空・角柱状のものを用了）。

- c) 支点・軸受けは強固な材料を使用し、かつ、支点間距離は正確にとる（実際には、接点部に焼きをいれた刃・受けを使用した）。

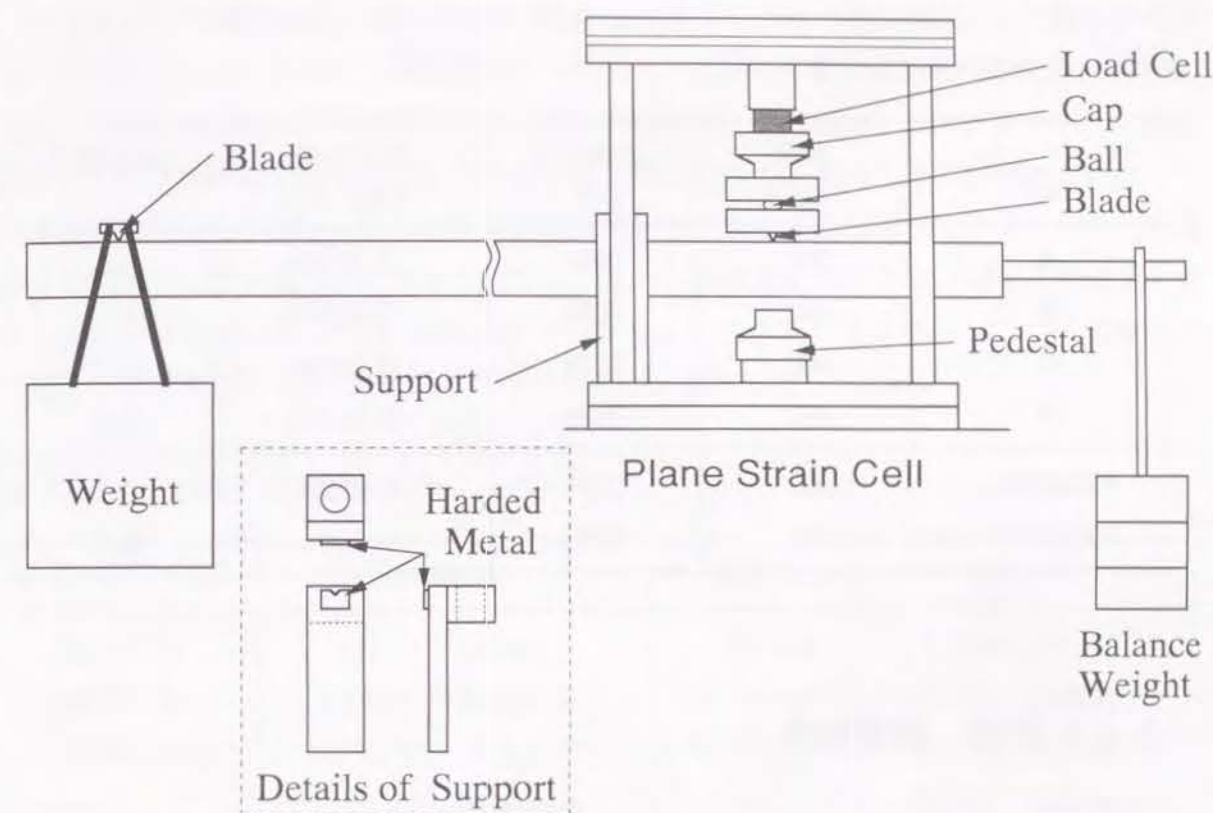


図 3-09 ロードセル検定装置の概略
(Diagram of Load Cell Approving Apparatus)

一般に、ロードセルの精度は、個々の載荷荷重値における理論曲線との偏差の最大値と、ロードセルにかけた荷重の最大値に対するひずみの割合をパーセントで表わしたものがよく用いられる。したがって、この値（ひずみ偏差と呼ぶことにする）が小さいほど、ロードセルは高精度であると見なせる。また、最大容量に対するひずみ出力を定格出力と呼ぶが、この値が大きいほど感度が高いものになる。自作したロードセルの精度についてもこの理論に従い、個々の荷重に対するロードセルの出力を、実際に試験を行うのと同じ装置・方法を用いて A/D 変換により測定した。具体的には、荷重ゼロの状態（天秤が水平に釣り合っている状態）から 20.0 kgf ずつ静かに載荷し、安定性を確認するために最大荷重載荷状態で数分間放置し、その後同じ荷重間隔で再び荷重ゼロまで静かに除荷した。得られた検定データをもとに、ひずみ偏差が最小になるように各ロードセルの較正值を決定

した結果、定格出力は 300kgf で 3000 μ 前後、ひずみ偏差は 0.3~0.6%であった。通常市販されている小型ロードセルの定格出力が 300kgf のもので 2000~3000 μ 程度、ひずみ偏差が 0.2~0.5%程度であることを考えると、自作したロードセルは十分な精度を有していると言える。表 3-01 には自作したロードセルの検定結果の一覧を示したが、最下段の2つは業者に発注して製作させたものである。

表 3-01 自作ロードセルの精度

ロードセル No.	容量 (kgf)	定格出力 (μ)	校正係数 (kgf/ μ)	非直線性
A	300	2880	0.10418	0.5
B	300	3393	0.08842	0.3
C	300	3138	0.09560	0.5
D	300	3153	0.09515	0.6
866500001	300	2325	0.1290	0.3
866500002	300	2205	0.1361	0.3

3.4.5 計測・制御精度

計測や制御の精度が、用いる変換器の精度に大きく左右されるのは自明である。パソコンを用いた自動計測・自動制御において、これらの精度を十分に発揮させるためには、用いるアンプ類や A/D、D/A 変換ボードなどの選択、さらにはこれらの設定にも注意しなければならない。具体的なチェック項目は、ひずみアンプ類については入出力の範囲や線形性、A/D、D/A 変換ボードに関してはその変換方法や分解能、などが考えられる。特に計測値は、自動制御における監視や指令信号出力の際の基準となるものであり、試験自身の精度に大きくかかわってくる。本研究では、変換器の精度が有効に発揮されるよう十分に考慮し、これらの選択・設定を行った。

1) 計測精度

上述のように、計測精度は試験全体の信頼性にかかわるものであるため、本研究では16 bit の分解能を有し、DMA 機能を搭載した高速・高分解能 A/D 変換ボードを用いた。本システムでは、入力レンジの設定が ± 5 (V) である A/D 変換ボードを用いたため、この分解能を電圧値に換算すると約 0.15 (mV) の精度になる (通常よく用いられている 12bit

型の A/D 変換ボードでは約 2.4(mV))。この精度を有効に活用するには、ひずみアンプの設定も重要となる。すなわち、試験時に必要となる各々の変換器からの出力に対して、ひずみアンプの入出力の線形性が保たれる範囲で、アンプからの出力が A/D 変換ボードのフルスケール (± 5 V) に対応するようにバランスやゲインなどを調整しなければならない。

以上の点を考慮すると、理論的には 16bit (精度としては 1/65536) という高い計測精度が得られることになるが、実際にはハードウェアに起因するいくらかの精度低下がある。また、用いる変換器の精度も重要で、容量・定格出力・非直線性・ヒステリシス・温度影響など、(予算の許す範囲内で) できるだけ高性能のものを使用するのが望ましい。

本研究で用いた試験システムの計測系統について、個々の計測項目の一覧とそれらの理論上の精度を示すと表 3-02 のようになる。なお、体積変化については、電子天秤のデジタル出力オプションによって RS-232C インタフェースを通して直接パソコンに取り込んだため、ひずみアンプや A/D 変換ボードなどによる精度低下はない。

表 3-02 計測精度 (理論上の計算による)

	測定範囲	基準値	精度
軸ひずみ	+21 ~ -7 mm	70 mm	0.0006 (%)
軸差応力	+300 ~ -60 kgf	3 \times 9 cm ²	0.0002 (kgf/cm ²)
中間主応力	+150 ~ 0 kgf	3 \times 7 cm ²	0.0001 (kgf/cm ²)
圧力	-1 ~ +6 kgf/cm ²	---	0.0001 (kgf/cm ²)
体積ひずみ	最小読取值 0.01g	189 g	0.005 (%)

(2) 制御精度

本試験システムの制御の基本は、D/A 変換ボードによるパソコンからのアナログ出力である。用いた D/A 変換ボードは 12bit の分解能であるが、出力レンジが -10(V) ~ +10 (V) に固定されていたため、外部回路を経由させることによってサーボアンプのバイアス電圧として適当な出力範囲になるよう調節できるようにした。最終的な制御精度は、制御用のサーボアンプの入力・出力ゲインや出力用変換器の出力スパンによって決定されるため、電圧出力の精度はあまり問題にならない。ここで重要となるのは出力可能な digit 数であり、この場合は 12bit、すなわち 4096 段階のコントロールが可能なことである。

本研究では、制御を各試験過程ごとに分けているため、必要に応じて初期値の変更を行うことも可能である。実際に用いた試験システムについて、軸変位、軸荷重、セル圧の制御精度の概略値を示すと表 3-03 のようになる。

表 3-03 制御精度 (理論上の計算による概略値)

	出力範囲	出力 digit 数	最小出力精度
軸変位	0 ~ 16 mm	-2000 ~ +2000	0.004 mm (0.005 %)
軸荷重	0 ~ 300 kgf	-1000 ~ +2000	100 gf (0.003 kgf/cm ²)
セル圧	0 ~ 6 kgf/cm ²	0 ~ +2000	0.003 kgf/cm ²

3.5 自動計測・自動制御プログラム

ここでは、本研究を行うにあたって作成した自動計測・自動制御プログラムを中心に、計測・制御の方法からプログラムの内容までを詳細に説明する。

3.5.1 特徴

試験の計測・制御をパソコンで行う場合、一般的によく用いられているプログラミング言語は BASIC である。BASIC は、パソコンの機種による依存性はあるもののハードウェアに近い部分を直接操作できる上、プログラムの開発やデバッグが比較的簡単であり、また、直接コマンドを実行できるなどの長所も併せ持っている。しかし、実行速度があまり早くないなどインタプリタ型言語特有の欠点もあるため、応力制御による動的载荷など、比較的早い処理を必要とする試験には無理が生じる。したがって、使用する言語としては、解析などの分野ではよく用いられているコンパイラ型言語の FORTRAN を基本とした。ただし、FORTRAN ではハードウェアに近い部分を直接操作することができないため、何らかの対策が必要となる。よって本研究では、ハードウェアを直接操作でき、処理速度やプログラムサイズにおいても最も有利なアセンブラ言語によるサブプログラムを併用することとした。

3.5.2 計測・制御方法

計測については、変換器からの出力をひずみアンプによって電圧値に変換・増幅し、パ

ソコンに組み込んだ A/D 変換器によって読みとる方法を基本とした。ひずみアンプでは、出力が A/D 変換器のフルスケール (±5V) にほぼ対応するように、出力値 (電圧) のゼロ点や較正值の調整を行っている。調整時に基準とした出力レベルを表 3-04 に示す。

表 3-04 基準出力レベル

軸差応力	-2 kgf/cm ² ~ +10 kgf/cm ² (-60 kgf ~ +300 kgf)
軸ひずみ	-10 % ~ +30 % (-7 mm ~ +21 mm)
セル圧、間隙水圧	-1 kgf/cm ² ~ +6 kgf/cm ²

また、体積変化の計測に用いる電子天秤からの出力は、オプションである RS-232C 出力を利用した。この出力は 1/100g 単位で直読でき、計測範囲は 0 ~ 120 g である。

一方、制御については、軸圧・セル圧ともにパソコンに組み込んだ D/A 変換器からの電圧出力を利用した。軸圧はサーボアンプの指令信号のバイアスとして D/A 出力を加えることにより、セル圧は D/A 出力を直接 E/P 変換器に接続することにより、それぞれ制御している。なお、E/P 変換器の出力流量はあまり大きくないため、ボリューム・ブラスター・リレーを併用して制御に遅れが生じないように注意した。

3.5.3 メインプログラム

(1) TESTIN

試験開始用のプログラムであり、試験データの入力や試験システムの初期設定などを行う。手順にしたがって処理項目を列挙すると次のようになる。

a) 試験データの入力

試験の種類、試料名、供試体番号、試験日など

b) A/D, D/A 変換ボードの初期設定

各チャンネルの接続設定、初期化など

c) 変換器のキャリブレーション

(軸変位計、軸荷重計、拘束棒荷重計、間隙水圧計、セル圧計)

較正值の入力、ゼロ点の設定、較正係数の算出

d) 基礎データの出力

試験データや較正係数などのプリンタ・ファイル出力

(2) SETPS, SETPC

供試体をセットしてから圧密直前までの操作を行う。供試体が砂質土か粘性土かによっ

てそれぞれ SETPS, SETPC を選択する。主な処理項目を手順にしたがって列挙すると次のようになる。

a) 供試体のセット・寸法測定

供試体のセット, 初期寸法の測定・入力など

(砂質土の場合には, 供試体のセットに 1 2 時間程度の解凍過程が含まれる)

b) セルのセット・注水

注水時, セル圧のゼロ点サンプリング, キャップの重量補正も行う

c) 供試体の真空(負圧)飽和化

二重負圧法による供試体と排水量測定系統の飽和化

(砂質土の場合には, CO₂ と脱気水による飽和化も可能)

d) 背圧载荷(放置)飽和化

背圧(通常は 196 kPa)を载荷し, 7~8 時間放置する

e) B 値測定

上記 c), d) の確認のための B 値測定

(過剰な有効拘束圧増大を防ぐため, セル圧の増分はマイナス側)

(3) ICONS, KNCONS, KPC, KDRN, KNOCNS

供試体の圧密制御プログラムである。圧密の種類により, 次のように名付けている。

ICONS : 等方圧密

KNCONS : K_o 圧密

KNOCNS : K_o 過圧密

KPC : p' 一定圧密(排水圧縮)

KDRN : セル圧一定圧密(排水圧縮)

また, 主な処理項目を手順にしたがって列挙すると次のようになる。

a) 基礎データの読み込み

初期寸法, ゼロ点, 較正係数など

b) 圧密(膨潤)制御

サブプログラムを起動

c) 結果の出力

圧密過程全体の結果を出力

(4) STSHER

静的せん断制御プログラムである。

a) 基礎データの読み込み

初期寸法, ゼロ点, 較正係数, 圧密後の諸データなど

b) せん断制御

サブプログラムを起動

c) 結果の出力

せん断過程全体の結果を出力

(5) KCCYC, PCCYC

繰返し载荷用のプログラムであり, 基本的に非排水条件のみに対応する。

a) 基礎データの読み込み

初期寸法, ゼロ点, 較正係数, 圧密後の諸データなど

b) 非排水繰返し载荷制御

サブプログラムを起動

c) 結果の出力

非排水繰返し载荷過程全体の結果を出力

3.5.4 サブプログラム

(1) GDAT, GTIM, KEYIN, OUTSTR, EK120A, DAOUT

FORTRAN では記述不可能な機能を受け持つプログラムで, すべてアセンブラで書かれている。各プログラムの概略を示すと次のようになる。

GDAT, GTIM: 日付や時間を取り込む

KEYIN : キー入力の有無を調べる

OUTSTR : 特殊ストリングを出力する(ビーブ音を鳴らすなど)

EK120A : 電子天秤の出力を RS-232C を介して読み込む

DAOUT : D/A 変換ボードを制御する I/O ポートへの出力を行う

(2) APHMFL

A/D 変換ボードを制御するためのハンドラ・ソフト。オブジェクト・モジュール化されており, CANOUPS 社から販売されているものをそのまま用いた。

(3) CLCK, DISPTM, DASUB1, DACTRL, START, SNGLAD

上述のアセンブラで書かれたプログラムの機能を FORTRAN で直接制御しやすいようにしたもので, 制御プログラムの基礎的な部分を受け持つ。各プログラムの概略を示すと次のようになる。

CLCK : 時間設定と経過時間の計算する
DISPTM : 経過時間を連続的に画面表示する
DASUB1, DACTRL: D/A 変換ボードからの出力を制御する
START : 制御スタートのタイミングを待つ
SNGLAD : A/D 変換ボードからデータを入力して電圧値へ換算する

(4) PSCLSG, PSCLSGK, ZERCAL, PSSIG3

試験過程でしばしば現れる、ひとつのまとまった計測や制御を受け持つプログラムである。各プログラムの概略は次のようである。

PSCLSG, PSCLSGK: それぞれの時点での供試体の寸法や応力状態を計算する
ZERCAL : 任意のチャンネルの A/D 出力を得る
PSSIG3 : 指定された値までセル圧の自動制御を行う

(5) PSZC, PSKNCN, PSKNOC, PSKPC, PSKDN, PSSTSH, PSDAAD, PSDY

メインプログラム内で、実質的な制御を行うプログラムである。それぞれが対応しているメインプログラムと、その制御概要は次のようである。

PSZC : TESTIN 内

試験システムのキャリブレーションを行う

- a) 校正係数の設定
- b) ゼロ点とキャリブレーション点でのサンプリングを行う
- c) 校正値を計算・出力する

PSKNCN : KNCONS 内

K o 圧密の制御を行う

- a) 圧密条件の設定
- b) p' 一定径路で基準 K o 状態を決定する
- c) 側方ひずみを制御しながら軸圧を増加させる (K o 圧密制御)
- d) 圧密過程の計算・結果出力

PSKNOC : KNOCNS 内

K o 過圧密の制御を行う

- a) 圧密条件の設定
- b) p' 一定径路で基準 K o 状態を決定する
- c) 側方ひずみを制御しながら軸圧を増加させる (K o 圧密制御)
- d) 側方ひずみを制御しながら軸圧を減少させる (K o 膨潤制御)
- e) 圧密過程の計算・結果出力

PSKPC : KPC 内

p' 一定圧密の制御を行う

- a) 圧密条件の設定
- b) p' 一定で軸圧を増加させながら排水圧縮を行う (p' 一定圧密制御)
- c) 圧密過程の計算・結果出力

PSKDRN : KDRN 内

セル圧一定圧密の制御を行う

- a) 圧密条件の設定
- b) セル圧一定で軸圧を増加させながら排水圧縮を行う (セル圧一定圧密制御)
- c) 圧密過程の計算・結果出力

PSSTSH : STSHER 内

排水、または、非排水条件で静的せん断の制御を行う

- a) せん断条件の設定
- b) せん断開始 (制御と計測)
- c) せん断終了 (自動停止、または、マニュアル停止)
- d) 結果の出力

PSDAAD, PSDY: KCCYC, PCCYC 内

非排水繰返し載荷の制御を行う

- a) 非排水繰返し載荷条件の設定
- b) 非排水繰返し載荷開始 (制御と計測)
- c) 非排水繰返し載荷終了 (終了キーの検出)
- d) 結果の出力

なお、自作した以上のプログラムのうち、異方 (K o) 圧密粘土の非排水静的せん断試験および非排水繰返し載荷試験を行うための一連の主なプログラムのソースリストを巻末に添付した。

第4章 試料および供試体の作製

4.1 概説

土質試験を行う場合、試料や供試体の質が結果に及ぼす影響は極めて重大である。試験装置や計測・制御システムの精度をいくら向上させても、用いる供試体が粗悪であれば結果の信頼性が著しく低下するのは明白である。したがって、試験を実施するにあたっては試料や供試体の作製方法を厳密に定めておかなければならない。

良い供試体であるための条件として、できる限り均質・均一であることが要求される。いわゆる要素試験を行う場合、用いる供試体は内部全体にわたって均質・均一でなければならない。また、比較実験を目的とする場合には、個々の供試体の作製時においてもその初期条件が同一でなければならない。均質・均一であるための条件には、外見的なものから内部の構造にいたるまでいくつか考えられる。外見的なものとしては形状・寸法など（供試体表面の凹凸を含む）、内部にかかわるものとしては密度・含水比・土粒子構造・応力状態（応力履歴を含む）などが挙げられる。これらのうち、内部的な因子、特に土粒子構造にかかわるものについては、試料の予備圧密段階から考慮する必要がある、せん断前に行う圧密（言い換えれば、せん断時の応力条件を調整する過程）だけでは解決しない。

本研究では、平面ひずみ条件下における土の力学特性の把握を目的とするため、砂と粘土の両方を試料として用いている。ここでは、それぞれの試料の物理特性を示すとともに、供試体の作製方法・手順について詳細に述べる。

4.2 砂供試体の作製

4.2.1 物理特性

本研究で用いた砂試料は、標準砂として一般的にもよく用いられている豊浦砂である。特に、1987～1988年にかけて行われた土質工学会による「飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験」(1988)に参加する機会を得たので、本研究では、その際に配布されたものを一貫して使用した。なお、この豊浦砂の物理特性は、一斉試験を実施した研究委員会の資料によると表 4-01 のようである。

表 4-01 豊浦砂の物理特性

土粒子の比重	: 2.637	D_{60}	: 0.218 mm
最大密度	: 1.639 g/cm ³	D_{50}	: 0.208 mm
(最小間隙比	: 0.609)	D_{10}	: 0.170 mm
最小密度	: 1.336 g/cm ³	U_c	: 1.282
(最大間隙比	: 0.973)	D_{max}	: 0.400 mm

4.2.2 作製方法

供試体の作製についても、用いた試料と同様に、上述した一斉試験の方法に従った。すなわち、一斉試験で支給された内寸法 1.5mm × 15.0mm の矩形孔を持つ長さ30cmの鉛管を用いて、空気乾燥した豊浦砂を一定高さからモールド内に自由落下させる、いわゆる空中落下法（上述の一斉試験仕様参照）により相対密度を調整した。相対密度 (D_r) は基本的に70%を基準とした（本試験での落下高さは約 34cm）が、相対密度の小さい供試体を作製する時には落下高さを小さくし、逆に相対密度の大きい供試体を作製するためには標準落下高さで調整 ($D_r = 70\%$) した後にモールド側面を軽く打撃した。なお、モールドは、三軸供試体用には市販のものを用いたが、平面ひずみ供試体用には市販のものがないため、図 4-01 に示すようなものを製作して使用した。

三軸用供試体、平面ひずみ用供試体の作製手順は、それぞれ次のようである。

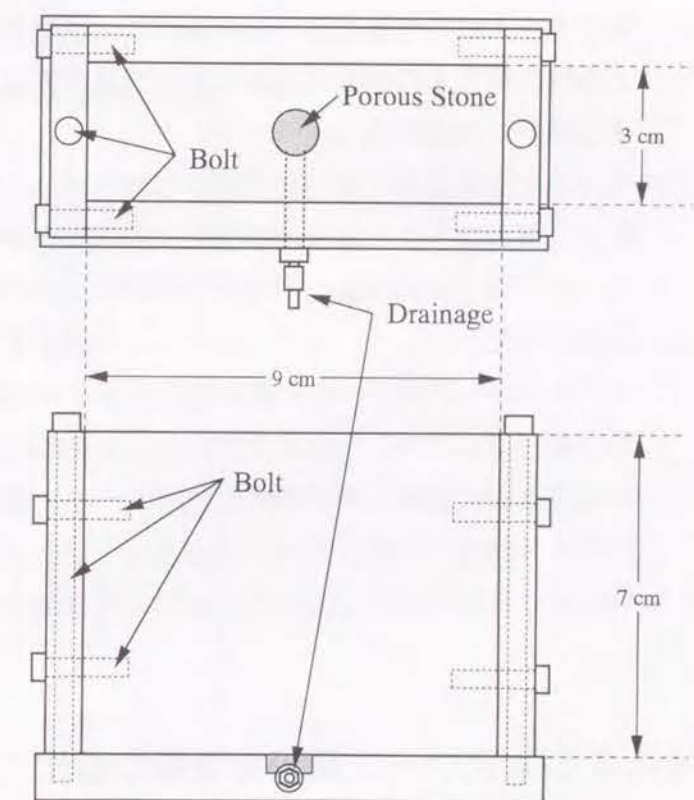


図 4-01 平面ひずみ供試体用型枠
(Mold for Plane Strain Specimen)

(1) 三軸供試体

- ペDESTAL上に濾紙と端面摩擦軽減用シートを載せた後、ゴムスリーブを取り付け、モールドを組み立てる。
- ゴムスリーブをモールドにとめ、負圧をかけて吸引する。
- 空中落下法で試料をモールド内に詰める。
- ストレートエッジで供試体の上面を整形し、その上に濾紙と端面摩擦軽減用シートを載せる。
- 供試体上面がキャップに接触するまでペDESTALを静かに上昇させ、ゴムスリーブを固定する。この時、ペDESTALの上昇量から供試体の高さを逆算して求める。
- 供試体内部に負圧をかけて自立させ、モールドを取り外す。
- 供試体の直径を測定（上・中・下各2方向から）する。

(2) 平面ひずみ供試体

- モールド内面にグリースを薄く塗り、組み立てる。
- 空中落下法で試料をモールド内に詰める。
- ストレートエッジで供試体の上面を整形する。
- 脱気水を入れた容器にモールドを浸し、下部から脱気水を吸水・部分飽和させる。
この時の脱気水の深さは試料の下部が浸る程度で、試料の上面が蒸留水で湿潤するまで静かに放置する。
- モールドを蒸留水の入った容器から取り出し、試料の上に2~3枚濾紙をかぶせ、その上に平らなアクリル板、断熱用の発砲スチロール、重り（5kg 程度）を載せる。
- モールドを冷凍庫（約 -20°C ）に入れ、12時間以上かけて凍結させる。
- 試料が凍結したらモールドを解体して供試体を取り出し、寸法を測定する。
- ペDESTAL上に濾紙と端面摩擦軽減用シートを載せ、その上に供試体をセットする。
そして、ゴムスリーブ装着用型枠を用いて供試体にゴムスリーブをかける。
- 供試体上面に濾紙と端面摩擦軽減用シートを載せ、ペDESTALを静かに上昇させて供試体を固定し、ゴムスリーブをキャップとペDESTALに取り付ける。
- 供試体に負圧をかけて自立させながら解凍させる。

4.2.3 ゴムスリーブ装着用型枠の製作

作製した平面ひずみ試験用の供試体をセル内にセットする時、ゴムスリーブを装着する必要がある。通常の三軸試験を行う場合、ゴムスリーブ拡大器と呼ばれるものが市販され

ているのでこれを用いればよいが、平面ひずみ試験用のものは市販されていない。これは、平面ひずみ試験がまだ基準化されていないこと、そのため、供試体の寸法も統一されていないこと、などが主な理由であると考えられる。したがって、本研究では、用いる供試体の寸法に合わせて、ゴムスリーブ装着用の型枠（拡大器）を製作した。製作する際に注意した点は、用いたセルではキャップが上盤に固定されているため、供試体をセットした後でゴムスリーブ装着用の型枠を解体して取り外せるようにしたことである。製作したゴムスリーブ装着用型枠の概略を図 4-02 に示したが、形状の違いによる差がある以外は三軸試験用のものと基本的に機能は同じである。材質は加工のしやすさからプラスチックを用い、型枠両片の接合部にはゴムをつけて気密性を高めた。また、ゴムスリーブを型枠内部に正確に密着させるため真空ポンプによる吸引のための金具を取り付け、型枠内部には吸引用の浅い溝を設けて負圧が型枠内部の全体に行き渡るようにした。この型枠は、輪ゴムによって組み立て、供試体セット後はこの輪ゴムもゴムスリーブの固定用に使用した。

なお、三軸試験・平面ひずみ試験ともに、ゴムスリーブは中性洗剤でよく洗い、きれいな布でふいてから使用した（供試体の飽和時に気泡などが付着するのを防止するため）。

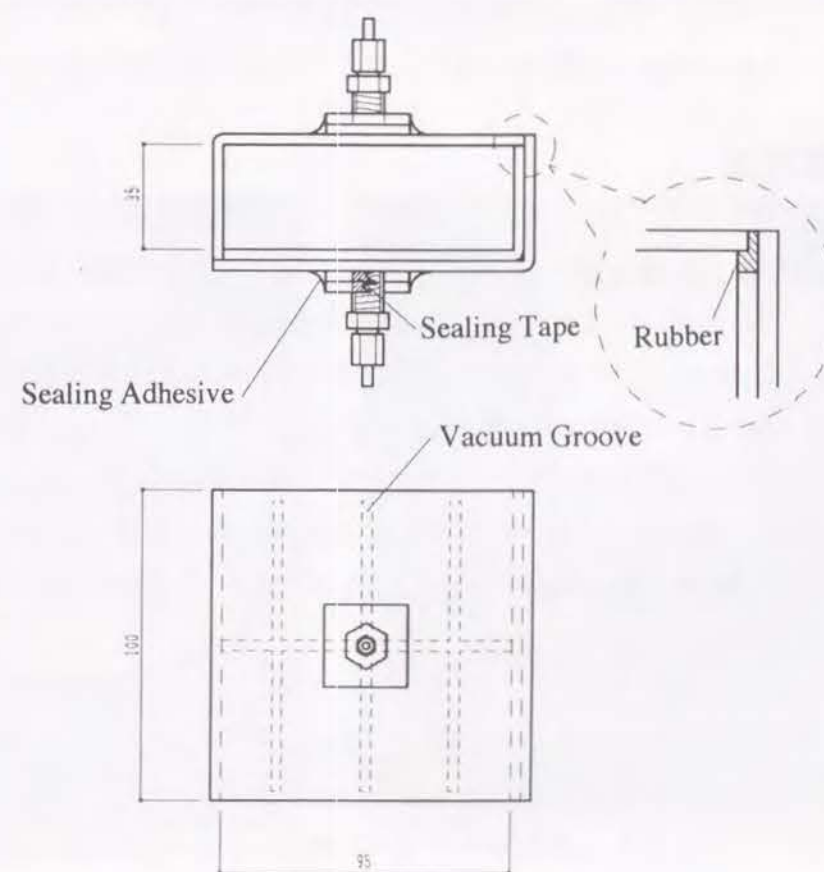


図 4-02 ゴムスリーブ装着用型枠
(Membrane Wearing Attachment)

4.3 粘土供試体の作製

4.3.1 物理特性

本研究で用いた粘土試料は、標準的な粘土としてよく用いられているカオリン粘土で、市販されている粉末状のものである。物理試験・力学試験ともに、これを $420\mu\text{m}$ のフルイでふるってから使用した。このフルイは、コンシステンシー限界である塑性・液性限界の試験で指定されている（土質試験の方法と解説(1990)）ものであるが、本研究では力学試験のものもこのフルイに統一した。なお、その物理特性は表 4.02 のようである。

表 4.02 カオリン粘土の物理特性

土粒子の比重	: 2.72	液性限界	: 98.0 %
塑性指数	: 65.8	塑性限界	: 32.2 %

4.3.2 作製方法

供試体は、予備圧密した粘土ブロックから切り出し・整形して作製した。供試体の形状は、三軸・平面ひずみともに、高さ:7cm×幅:9cm×奥行き:3cmの角柱である。そして、平面ひずみ試験では試験時にひずみ拘束枠を取り付けて側方への変形を拘束し、三軸試験では拘束枠を取り付けずに側方への変形を自由にした。ここで、三軸試験では本来、軸対称条件を満足させるため円柱状の供試体（寸法は、直径 5cm×高さ12cm程度が標準）を用いる必要があが、本研究ではあえて平面ひずみ試験と同じ角柱状の供試体を用いた。これは、供試体の形状の違いによる影響を避けるためであり、厳密には軸対称条件とはならない点に注意する必要がある。

以上のように、供試体を作製するためにはまず予備圧密した粘土ブロックを作製する必要がある。予備圧密は、以下に示すような手順で行った。

- 粉末状の粘土に水を加え（液性限界の 2~3 倍以上）、十分に練り混ぜる。
- 予備圧密セルに練り混ぜた粘土を入れ、粘土表面にさらに水を加えた後、真空状態で24時間以上脱気する。
- 約 2 kPa の鉛直圧力をかけ、沈下が落ちつくまで 1~2 週間放置する。

d) 鉛直圧力約 10 kPa で圧密を開始し、 \sqrt{t} 法により圧密終了を確認する。

e) 上の d) と同様の方法で、20, 50 kPa と段階的に圧密を行う。

すべての圧密段階が終了したら、容器から粘土ブロックを取り出し、ラップで密封し、湿潤箱に入れて保存した。なお、圧密終了後に膨潤させないのは、膨潤による粘土の軟弱化を避けるためである。この場合、圧密による拘束圧は、粘土ブロック表面におけるサクシオンによって保たれるものと考えられる。

予備圧密ブロックが用意できれば、次は供試体の切り出し・整形であるが、これには、通常の三軸試験などで用いられるトリマーを利用した。上述のように、平面ひずみ・三軸試験ともに角柱状の供試体を用いるため、平面ひずみ供試体用のアタッチメントを自作し、このトリマーに取り付けて供試体を作製した。具体的には、まず、粘土ブロックをプラスチック板を加工した整形用の台板（自作：図 4.03 参照：ポイントは整形台の上に少し隙間をあけて固定できる 9cm×3cm のケガキの入った透明板で、予め隙間にワイヤーソーをあてがい、切り出す位置を設定できるようになっている）に載せて供試体の側面を整形する。これにより幅:9cm×奥行き:3cmの柱状に正確に切り出される。次にこれを横に寝かせ、高さ整形用のプラスチックシート（自作）を用いて高さが 7cm になるよう垂直にカットした。以上の手順により、多少のコツは必要であるが、ほぼ 7cm×9cm×3cm の正確な角柱状の供試体を作製できる。なお、これら供試体の整形にはすべてワイヤーソーを用いた。

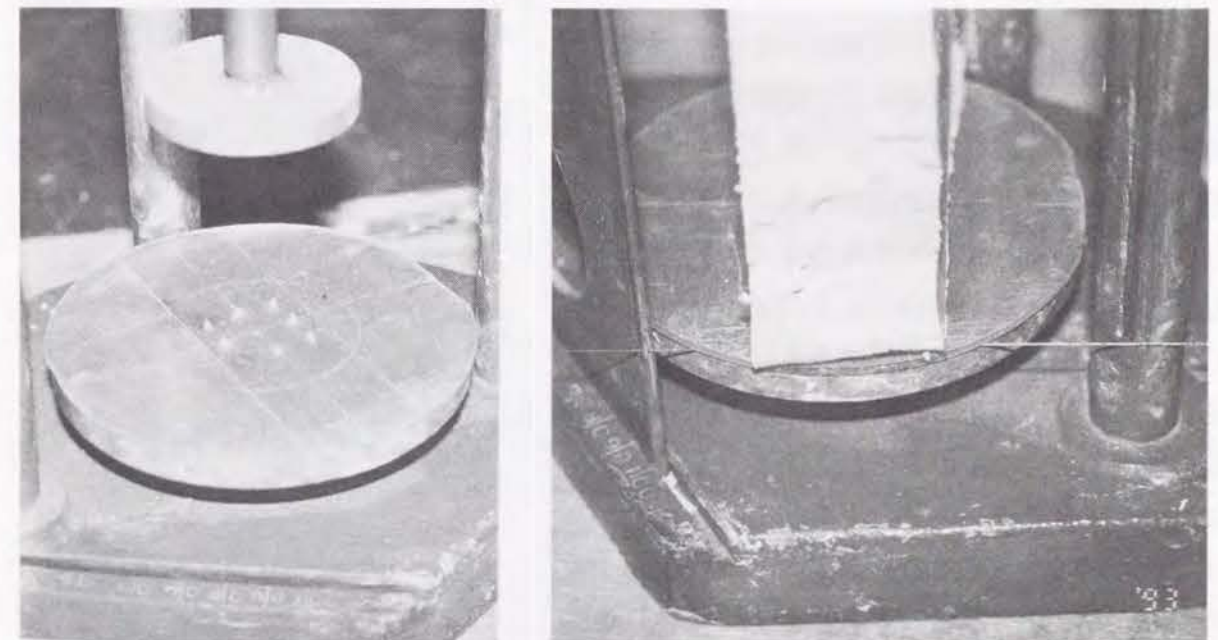


図 4.03 平面ひずみ供試体用アタッチメント
(Attachment for Plane Strain Specimen)

4.3.3 予備圧密セルの製作

粘土の供試体は、上述のように、予備圧密した粘土ブロックから切り出して作製している。本研究では、圧密条件の違いによるせん断特性の比較も目的としているため、予備圧密段階での試料のばらつきは最小限に抑える必要がある。よって、予備圧密による粘土ブロックは、均質でできるだけ大きいものが好ましく、同じブロックから多数の供試体が切り出せるものがよい。このため、予備圧密用のセルも新たに自作した。

切り出す供試体の数を増やすには粘土ブロックの断面積を大きくする必要がある。また、圧密するピストンの気密性を考えると円形の容器が好ましい。よって、内径 28cm のアクリル円筒を用いることにした。この

内径を用いると、平面ひずみ用の供試体（幅：9cm × 奥行き：3cm 断面）が 8 コ切り出せることになる。一方、載荷ピストンの断面積が大きくなると、それに比例して圧密荷重も大きなものが必要となる。よって、載荷は空気圧を用いることにした。

以上の点を考慮した予備圧密セルの写真を図 4-04 に示す（これは実際に予備圧密を行っている最中の写真である）。載荷板と底板には濾紙が敷いてあり、載荷板からはパイプを通してセル外へ排水が行われるようになっている。このセルを製作するにあたって、最も問題になるのはピストンと円筒との気密性である。空気圧により荷重を載荷するため、ある程度の圧力にも耐えられるような気密性確保する一方で、周面摩擦はできるだけ小さくする必要がある。図 4-05 には製作した予備圧密セルの断面図を示したが、この図に示すようなピストンを考えた。このようにすると、載荷圧力に比例した力で



図 4-04 予備圧密セル
(Consolidometer)

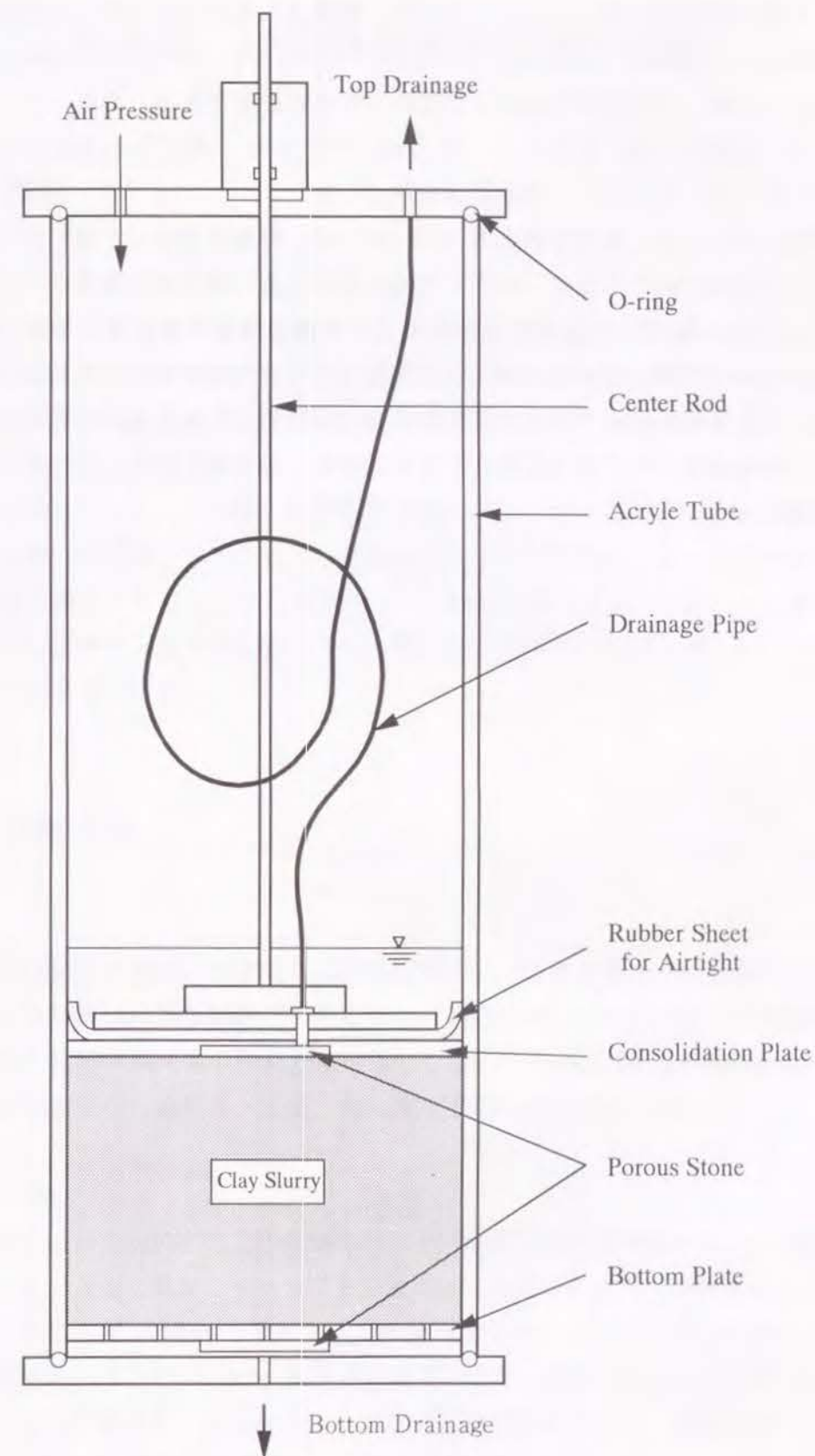


図 4-05 予備圧密セルの概略
(Diagram of Consolidometer)

ゴムシートが円筒内面に押しつけられるため、載荷される空気圧に応じた気密性が確保でき、必要以上の周面摩擦が加わることもない。このピストンを目的通り機能させるため、ゴムシートと円筒との接触部分の加工には特に注意が必要である。また、このゴムシートは乾燥すると気密性が低下するため、図 4-04 や図 4-05 を見てもわかるように、載荷板の上側には水をはってゴムシートの乾燥を防止した。

この予備圧密セルは、鉛直圧密応力 200~300 kPa 程度までなら十分に利用可能であるが、圧密が長期間にわたる場合、わずかではあるがセル円筒の側方膨張が生じる。したがって、特に 100 kPa 以上の圧密圧力を必要とする場合や数カ月に及ぶ予備圧密を行いたい場合などには、円筒に金属性のタイバンドなどを付けた方がよいと思われる。ただ、予備圧密は、せん断直前に行う圧密を考えた場合、供試体の作製に支障がない範囲のできるだけ低い圧密圧力で行った方がよいことを考えると、通常はこのようなタイバンドは必要ないと思われる。

第5章 砂の静的平面ひずみ挙動

5.1 概説

ここでは、構築した平面ひずみ試験システムを用いて行った、砂の静的平面ひずみ試験の結果をもとに、その力学特性について考察する。試験に用いた試料は豊浦標準砂であり、試料の物理特性や供試体の作製方法については第4章で述べたとおりである。圧密は平面ひずみ状態であることを考えると K_0 圧密を行うのが基本であるが、等方圧密した供試体についても試験を行った。これは、圧密条件の違いが力学特性に及ぼす影響を調べること、あるいは、構築した試験システムによって得られた結果を他機関による既存の結果と比較してその性能を確認すること、なども目的としているためである。また、せん断中の排水条件については排水せん断を基本とするが、後に行う粘土のせん断特性との比較なども考えて非排水せん断も行った。

5.2 試験方法

静的せん断試験の方法は、基本的には地盤工学会の「土質試験の方法と解説」に従ったが、平面ひずみ試験は特殊な試験でもあるため、基準外の方法や独自の方法を用いた部分もある。用いた試料や供試体の作製方法については既に述べた（第4章参照）ので、ここでは、供試体の設置から飽和化・圧密・せん断までの手順を説明する。

(1) 供試体の設置

まず、凍結によって作製された砂供試体の上下に濾紙と端面摩擦軽減用シートをつける。これらをベDESTAL上に乗せ、キャップを接触させてからゴムスリーブをかける。そして、自立させるための負圧 4.9kPa を載荷し、12時間以上放置して試料を解凍させる。ただし、この間の拘束圧の大きさが 4.9kPa と非常に小さいため、供試体に不必要な異方応力履歴を与えないように注意する（特に軸差応力が常にゼロであること）。試料が解凍されたら、初期拘束圧 19.6 kPa を負圧で載荷し、これを基準状態とする。そして、拘束板と供試体の間に隙間ができないように、初期拘束圧による供試体の変形がおさまってから拘束枠を取り付ける。次に、この初期負圧をゆっくりセル圧に置換し、供試体の設置が完了する。

なお、供試体の上下面に付けた端面摩擦軽減シートはゴムスリーブとテフロンシートをシリコングリースで貼り合わせたもの（Tatsuoka et al.(1984) の文献を参考にした）で、供試体端面での摩擦はかなり軽減される。また、供試体と拘束板との接触面についても、拘束板にテフロンシートを貼り付け、その上にシリコングリースを塗ることにより、先の端面摩擦軽減シートと同様の要領で摩擦の軽減を図っている。

(2) 圧密までの手順

供試体の設置後は、供試体およびその周辺を飽和させる過程に入る。飽和化は、基本的には Ampadu et al.(1989) と同様に二重負圧法と呼ばれる方法により行った。これは、有効拘束圧を一定に保ったまま間隙圧を -98kPa 程度まで下げて不溶空気除去した後、この負圧を解除しながら脱気水を間隙中に流し込み、さらに供試体の体積分以上の脱気水を微小差圧（水頭差で 15cm 程度）のもとで通水して残留する気泡を除去するものである。この結果、供試体やその周辺はほとんど飽和するが、この後さらに背圧 198kPa を載荷して $6\sim 7$ 時間放置することにより、完全飽和をめざした。なお、三軸試験用の供試体については、第7章で説明する非排水繰返し三軸試験の基準（一斉試験(1988)のもの）に従い、二酸化炭素と脱気水による飽和化を行った。

飽和状態の確認は、Skempton の間隙水圧係数 B 値を求め、 B 値 ≥ 0.96 をもって完全飽和とみなした。なお、 B 値を求める際には、最初にセル圧を減少させてから元の値に戻す方法（土質工学会：第2回三軸圧縮試験実技講習会報告(1983)を参考）を用いた。これは、供試体が完全飽和していない場合、セル圧を上昇させることによって拘束圧も増加し、不必要な圧密履歴が加わるのを避けるためである。具体的には、非排水状態のままセル圧を 49kPa だけゆっくり減増させ、その時のセル圧と間隙水圧の変化量の比を求めることになる。

(3) 圧密の手順

圧密については、まず最初に、等方圧密を行った。平面ひずみ状態を考える場合、異方圧密するのが本来的ではあるが、ここでは圧密条件の違いが力学特性に及ぼす影響や軸対称三軸条件との比較、さらには構築した試験システムの性能試験をも目的としているためである。ひととおり等方圧密供試体による試験データの収集が終了した後は異方圧密を行い、その静的せん断特性を調べた。異方圧密は、平面ひずみ条件を考慮した場合、基本的には K_o 圧密を行うのが妥当であると考えられるが、圧密時の応力経路の依存性についても検討するため、 p' 一定の応力経路や σ_3' 一定の応力経路による圧密（排水圧縮）も行った。それぞれの圧密条件における応力経路の概念図を図 5-01 に示したが、先にも述べたように、供試体セット時の 19.6kPa の等方応力状態を基準状態とした。

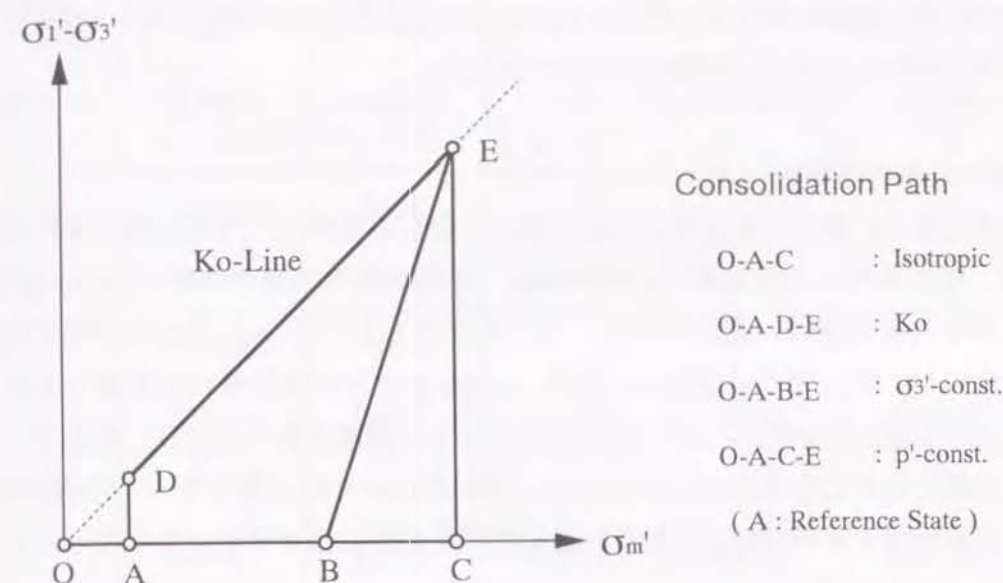


図 5-01 圧密経路の概念図

(Images of Stress Path for Consolidations)

(a) 等方圧密

まず最初に等方圧密であるが、これについては負圧で行った。この理由は、負圧による拘束圧載荷がセル室を必要としないため、等方圧密が終了してから拘束棒を取り付けることができるからである。この方法を用いると、等方圧密における供試体の体積収縮によって供試体と側方のひずみ拘束板との間に隙間ができるのを防ぐことができるが、その一方で、 98kPa を越える圧密が行えないという欠点も存在する。なお、負圧による圧密を行った場合、圧密過程が終了してから供試体を飽和させることになる。

(b) 異方圧密

次に異方圧密であるが、基本的な K_o 圧密の制御方法は、初期状態 ($\sigma_3' = 19.6\text{kPa}$: 等方応力状態) から平均有効主応力一定の排水経路で目的とする応力比にした後、 K_o 条件を保ちながら軸圧やセル圧を増加させるものである。実際には、軸圧を徐々に増加させながら、体積ひずみと軸ひずみの差より計算した側方ひずみの変動が $\pm 0.005\%$ 以内になるよう逐次側圧を制御することにより K_o 条件を満足させている。この時の軸圧の増加速度は約 0.3kPa/min である。所定の応力状態に達した後も、体積ひずみの変化速度が $10^{-4}\%$ /min 以下になるまで軸差応力を一定に保ったまま放置し、一次圧密の終了を確認してから次の段階へ進んだ。また、予備試験によりあらかじめ K_o 値を求めておき、この値を用いて K 値 ($= \sigma_3' / \sigma_1'$) 一定の経路で圧密（排水圧縮）したものもある。この時の

側方ひずみの変動は± 0.008%以下であった。なお、 p' 一定・ σ_3' 一定の応力経路による圧密（排水圧縮）については、所定の応力状態（図 5-01 参照）まで負圧によって等方圧密した後、過剰間隙水圧が発生しないように上述の K_0 圧密と同様の載荷速度で軸圧を増大させながらセル圧を調整する方式で行った。

(4) 静的せん断の手順

静的せん断は、排水・非排水せん断ともに、ひずみ制御で行った。せん断時の軸ひずみ速度は、排水条件の場合は約 0.04%/min、非排水条件の場合は約 0.36%/min である。これらのせん断速度は、変位制御モードにある軸圧サーボへの D/A 出力時間間隔により決まるもので、あらかじめ測定してある 1 digit あたりの変位量から逆算して指定する。

サンプリングについては、特にせん断初期はその間隔を細かくとり、軸差応力の急激な増大も正確に測定できるようにしている。プログラムでは、サンプリングの段階を複数に分け、初期段階・次の段階とそれぞれ時間間隔を個別に指定するようになっている。

5.3 等方圧密静的せん断挙動

ここでは、平面ひずみ条件における砂の基本的な静的せん断特性を調べることを目的としている。また、これは、構築した平面ひずみ試験システムの性能試験も兼ねており、いくつかの条件において試験を行った。

砂のように透水性の高い土の静的せん断挙動を調べる場合、排水状態における強度・変形特性に着目するのが一般的である。したがって、この目的で行う力学試験も本来なら排水条件とすべきである。また、平面ひずみ条件では、その応力・変形条件を考えると、供試体は異方圧密（ K_0 圧密）するのが本来的であると考えられる。しかし、上述のように、ここでは砂の基本的な静的せん断特性を調べることや構築した試験システムの性能を確認することも目的としているため、等方圧密・異方圧密のそれぞれの圧密条件において排水・非排水の両条件で試験を行った。

5.3.1 等方圧密非排水せん断

ここでは、等方圧密された飽和豊浦砂の非排水静的せん断試験の結果について、試験結果をもとに考察する。なお、供試体条件および試験結果の一覧を表 5-01 に示した。

表 5-01 供試体条件・試験結果の一覧（等方圧密非排水せん断）

相対密度 D_r (%)	間隙比 e_0	拘束圧 σ_{30}' (kPa)			
破壊時 σ_1' (kPa)	破壊時 σ_2' (kPa)	破壊時 σ_3' (kPa)	M (q/p') _f	内部摩擦角 ϕ' (°)	破壊時 b 値
69.05	0.7267	98.0			
834.4	366.2	184.9	1.406	39.58	0.2791
68.63	0.7283	98.0			
813.1	381.5	198.6	1.323	37.41	0.2977
60.84	0.7575	49.0			
549.0	246.6	118.3	1.414	40.20	0.2979
50.52	0.7960	49.0			
441.4	205.5	103.4	1.360	38.88	0.3021

(1) 応力-ひずみ関係

図 5-02 に、軸差応力（ $\sigma_1' - \sigma_3'$ ）および中間主応力（ $\sigma_2' - \sigma_3'$ ）と軸ひずみの関係を示した。これらの図より、軸差応力はピーク強度に至るまで軸ひずみとともにほぼ直線的に増大しているのがわかる。これは、砂の圧密降伏応力が非常に高いために通常の拘束圧においては弾性的な挙動が強く表れること、また、せん断が進むとダイレイタンシー（体積膨張）による間隙水圧の低下（後述の図 5-04 参照）に伴って有効拘束圧が増大すること、などによると考えられる。また、一般的にも知られているように、強度のピークの表れ方は三軸試験のそれより顕著であり、供試体の相対密度が大きいと最大強度が大きくなるとともに強度のピークも顕著に表れるようになる。なお、中間主応力については、そのピークの位置は軸差応力のそれと一致しており、その発現の様子も軸差応力にはほぼ比例している。

(2) 応力経路

図 5-03 に、応力経路を示した。ただし、縦軸は偏差応力（＝軸差応力： $\sigma_1' - \sigma_3'$ ）、横軸は平均有効主応力（ $(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') / 3$ ）である。これらの図を見ると、応力経路は供試体の初期間隙比によらず（相対密度によらず）ほぼ相似形であるのがわかる。すなわち、わずかに上に凸ではあるが、ほぼ傾き一定の直線上を移動しながら供試体は最

大強度に到達している。しいて言えば、せん断開始直後は平均有効主応力はあまり変化せず軸差応力が主に増大し、その後は応力比一定の直線（ここでは破壊規準線に相当）に漸近しながら（沿うように）偏差応力・平均有効主応力ともに増大し、そのままピーク強度に至っているのがわかる。砂の場合、圧密降伏応力が非常に高いため過圧密比の高い粘土の応力経路に似た形状になることが予想できるが、この結果では応力-ひずみ関係の場合と同様に、負のダイレイタンスによる間隙水圧の影響がかなり大きく現れているものと考えられる。なお、ここでの破壊規準線に相当する応力比の値も供試体の初期間隙比によらずほぼ同じであり、その値は 1.4~1.5 程度であった。

(3) 間隙水圧

図 5-04 に、間隙水圧と軸ひずみの関係を示した。これらの図を見ると、間隙水圧の値は、せん断開始後一旦は増大するが、その後は減少して負の値に転じ、最終的には一定値に収束しているのがわかる。間隙水圧の値が大きく負の値に転じるのは、砂の場合、せん断力による砂粒子の負のダイレイタンス（体積膨張）が大きく影響しているためであると考えられる。また、間隙水圧が最終的には一定値に収束しているが、これは、試料がいわゆる限界状態（せん断が進行しても体積ひずみは変化しない）に達しているためであると考えられる。なお、間隙水圧の収束値は、拘束圧が同じ場合、相対密度が大きいものほど低い値になっている。これは、密度が大きいものほどダイレイタンスの影響が顕著に現れ、体積が膨張しようとする効果が大きく現れるためであると考えられる。

(4) 中間主応力係数

図 5-05 に、中間主応力係数 ($b = (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$) と軸ひずみの関係を示した。これらの図を見ると、中間主応力係数の値はせん断開始後速やかに 0.2~0.3 程度まで減少し、その後はほぼ一定またはわずかに増加しながら破壊に至っているのがわかる。また、破壊時の中間主応力係数の値については、供試体の密度（相対密度）や拘束圧の大きさによらずほぼ 0.3 になっており、注目すべき点であると考えられる。なお、供試体が等方圧密されているため、せん断が進行して供試体の応力異方性がある程度明確になるまでは、中間主応力係数の値は意味を持たない。特にこの試験においては、供試体と拘束棒との間に隙間ができることを避けるため、拘束棒取り付け時に微小荷重による締め付けを行っている。したがって、せん断開始時の主応力はひずみ拘束方向の方が軸方向よりもわずかに大きくなっている点に注意しなければならない。

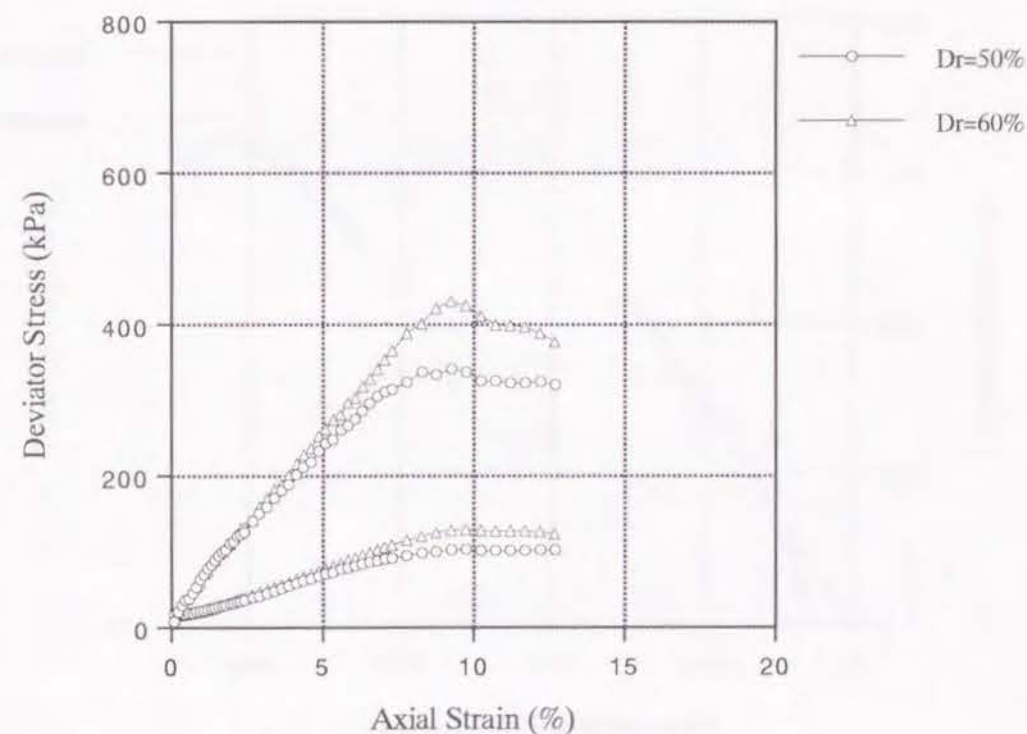
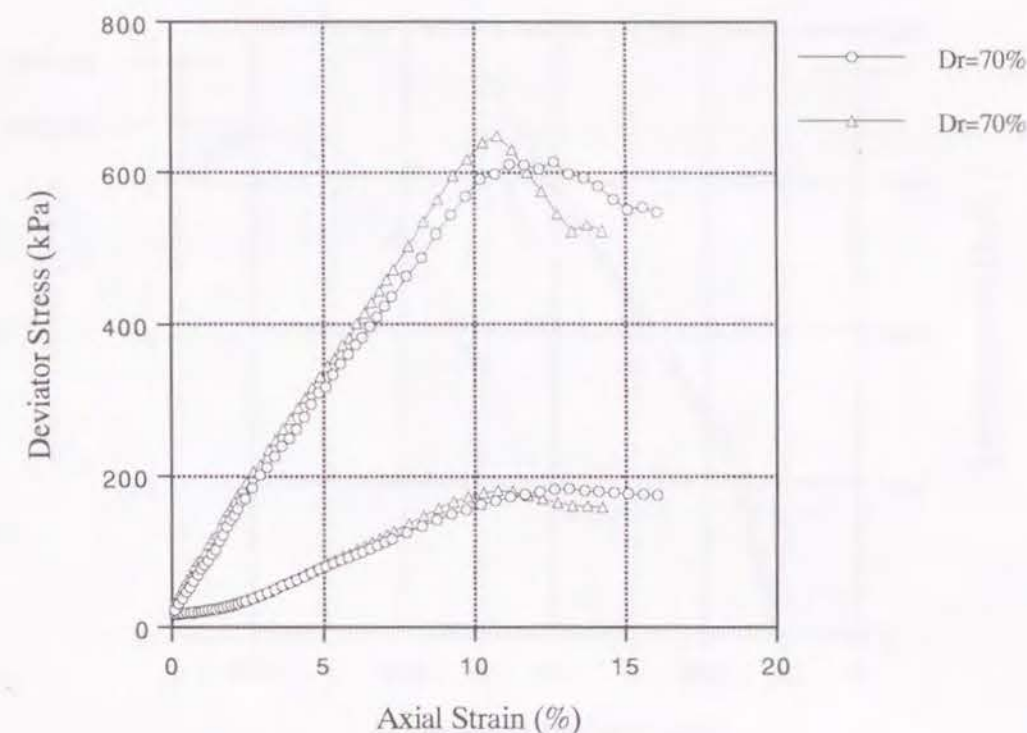


図 5-02 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

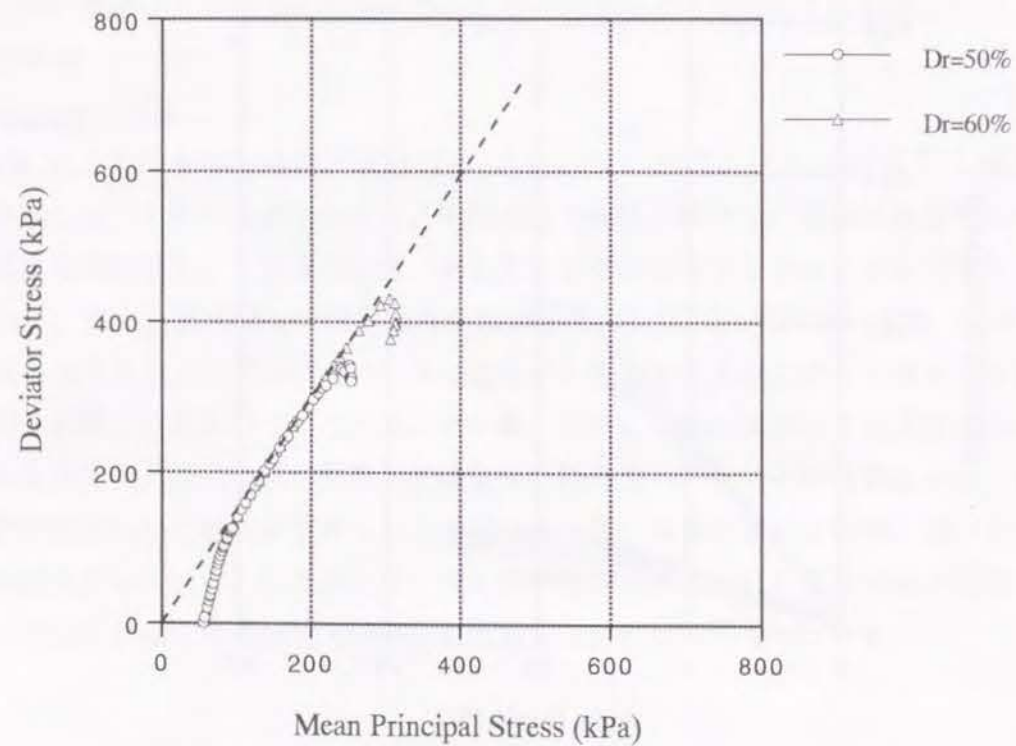
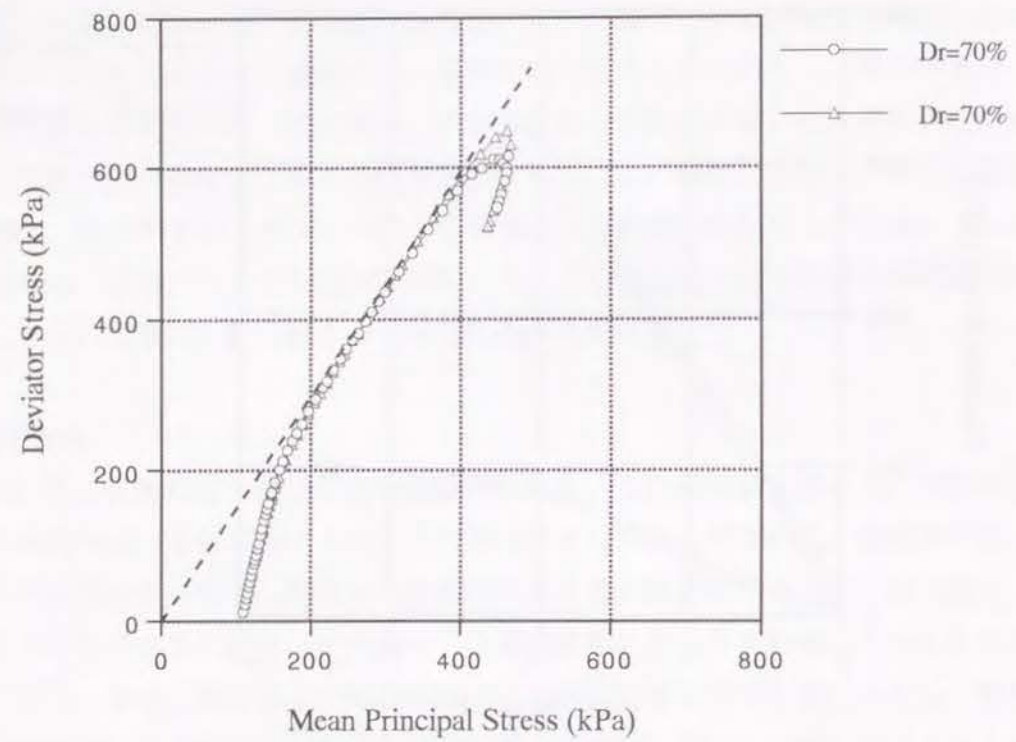


図 5-03 応力径路
(Stress Path)

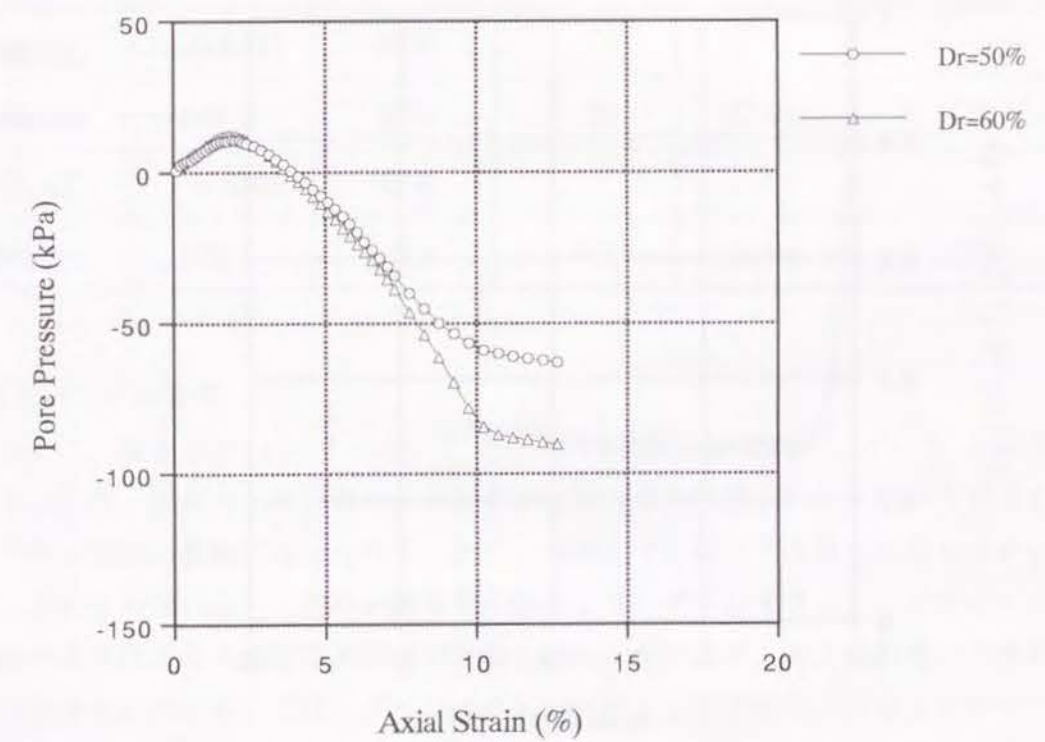
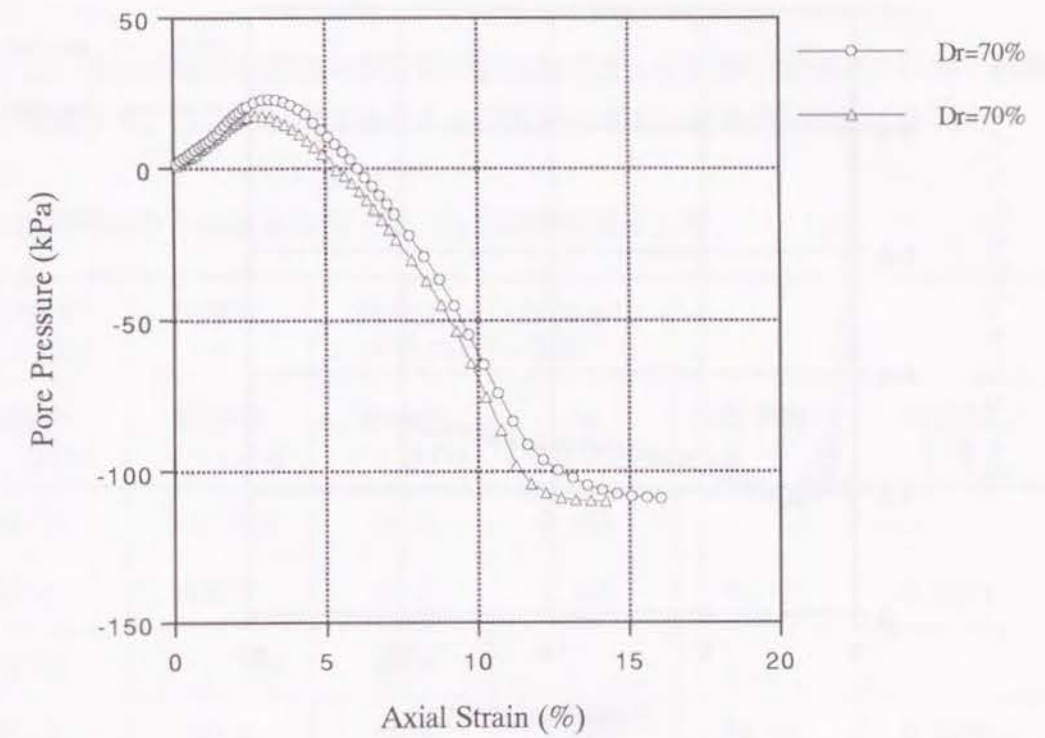


図 5-04 間隙水圧一軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Pore Pressure Relationships)

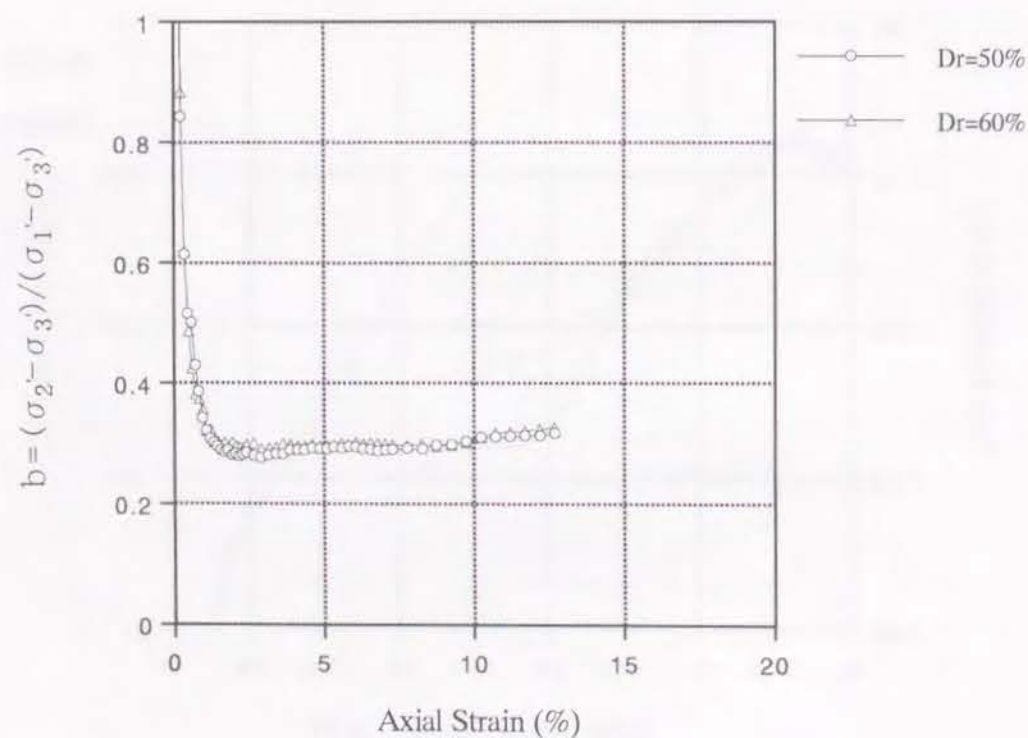
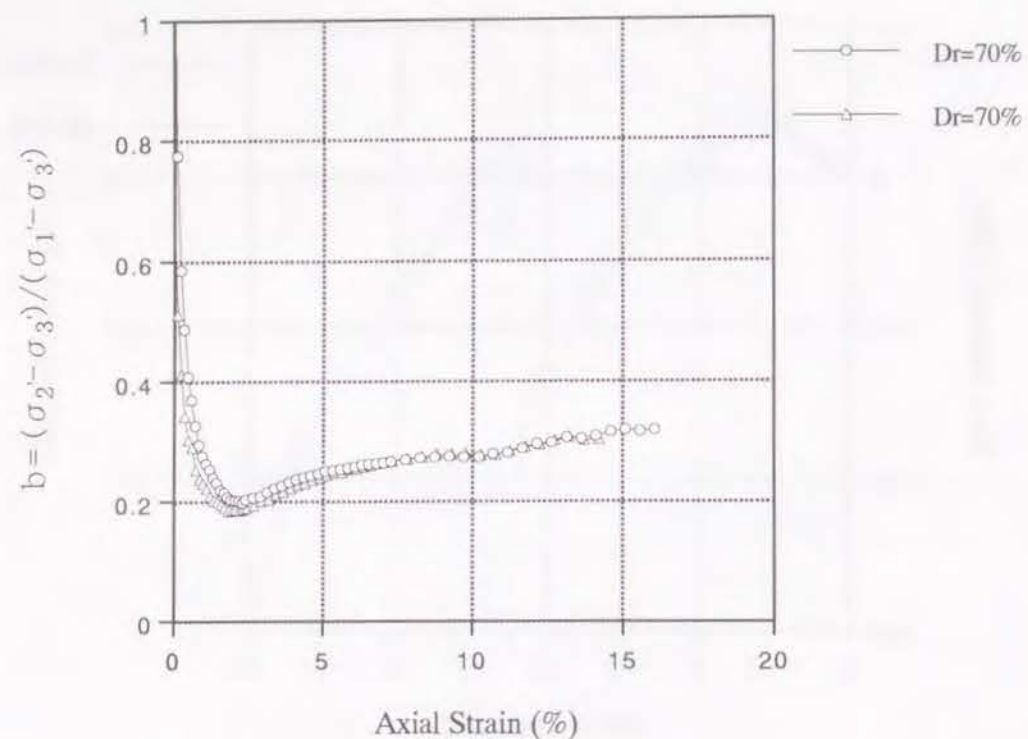


図 5-05 中間主応力係数－軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. b-value Relationships)

5.3.2 等方圧密排水せん断

ここでは、等方圧密された飽和豊浦砂の排水静的せん断試験の結果について、試験結果をもとに考察する。なお、供試体条件および試験結果の一覧を表 5-02 に示した。

表 5-02 供試体条件・試験結果の一覧（等方圧密排水せん断）

相対密度 D_r (%)	間隙比 e_o	拘束圧 σ_{30}' (kPa)	間隙水圧 係数: B		
破壊時 σ_1' (kPa)	破壊時 σ_2' (kPa)	破壊時 σ_3' (kPa)	M (q/p') _f	内部摩擦角 ϕ' (°)	破壊時 b 値
49.72	0.7920	49.0	0.957		
225.6	100.5	48.8	1.415	40.11	0.2924
60.31	0.7535	49.0			
248.0	110.2	48.8	1.469	42.17	0.3082
69.93	0.7184	49.0			
275.9	116.7	48.7	1.544	44.12	0.2993
80.02	0.6817	49.0			
298.0	126.5	48.8	1.580	45.93	0.3116
93.82	0.6315	49.0			
368.1	129.5	49.0	1.751	49.91	0.2523

(1) 応力－ひずみ関係

図 5-06 に、軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$) および中間主応力 ($\sigma_2' - \sigma_3'$) と軸ひずみの関係を示した。排水せん断の場合、非排水せん断の場合に見られた、ピーク強度までの応力－ひずみ関係の直線性は見られず、また、破壊までの軸ひずみ量もかなり小さいのがわかる。これらの違いは、上述の非排水せん断のようにダイレイタンスが生じて、供試体が排水条件にあるため有効拘束圧が変動しないことによると考えられる。つまり、前述した非排水せん断においては、ダイレイタンスによる有効拘束圧の増大に伴って供試体の剛性も徐々に大きくなるため、供試体が破壊するまで応力－ひずみ曲線の傾きがほとんど低下しないなど、ここに示した排水せん断とは大きく異なった結果が得られたものと

考えられる。密度の影響については、供試体の密度が大きければ大きいほど最大強度は大きくなり、強度のピークの現れ方も顕著になっているのがわかる。この傾向は、上述した非排水せん断の結果とも一致する。また、排水せん断では、供試体の密度が大きくなるにつれて最大強度が大きくなるが、ピーク強度に至るまでの軸ひずみ量は小さくなる傾向が確認できる。なお、中間主応力については、非排水せん断の場合と同様に、そのピークの位置は軸差応力のそれと一致しており、その発現の様子も軸差応力にはほぼ比例しているのがわかる。

(2) 応力経路

図 5-07 に、応力経路を示した。ただし、縦軸は偏差応力（＝軸差応力： $\sigma_1' - \sigma_3'$ ）、横軸は平均有効主応力（ $(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') / 3$ ）である。これらの図を見ると、応力経路の形状は供試体の初期間隙比によらず（密度によらず）相似形になっており、拘束圧の大きさのみに依存しているのがわかる。また、その形状はほぼ傾き一定の直線であるが、厳密にはわずかに上に凸の曲線になっているのがわかる。これには、中間主応力の影響が少なからず関係していると考えられる。すなわち、軸対称三軸条件の場合、排水せん断においては $\sigma_3' = \text{一定}$ （さらに $\sigma_3' = \sigma_2'$ ）であるためこの直線の傾きは 3.0 ちょうどになるが、平面ひずみ条件では $\sigma_2' > \sigma_3'$ であり、中間主応力（ $\sigma_2' - \sigma_3'$ ）が大きくなればなるほどこの直線の傾き（つまりは接線の勾配）は 3.0 より小さくなるためである。なお、破壊時の応力比（ $q / p' = M$ ）の値は 1.6 程度（1.5～1.7）であった。

(3) 体積ひずみ

図 5-08 に、体積ひずみと軸ひずみの関係を示した。これらの図を見ると、供試体は、せん断開始後一旦は圧縮されるが、その後ダイレイタンスによる体積膨張が進行しながら最大強度に至っているのがわかる。これらの傾向は、上述した非排水せん断における間隙水圧の挙動に対応している。強度のピークを越えた後も供試体は体積膨張を続けるが、残留強度に至っても供試体の体積膨張はしばらく続き、軸差応力に比べて収束するのは遅い。なお、体積ひずみは、拘束圧が同じ場合、相対密度が大きいものほどその収束値は負側に大きくなり、ダイレイタンスによる体積膨張が顕著に生じていることを表していると考えられる。ただし、相対密度が 70 % を越える場合、最終的な体積膨張量は相対密度の影響をそれほど受けないようである。

(4) 中間主応力係数

図 5-09 に、中間主応力係数（ $b = (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$ ）と軸ひずみの関係を示した。これらの図を見ると、中間主応力係数の値はせん断開始後速やかに 0.2～0.3 程度まで急増し、その後はわずかに増加しながら破壊に至っているのがわかる。b

値が急増するのは供試体の体積ひずみが一旦増加して減少に転じ始める辺りまでであり、ダイレイタンスによる体積膨張が徐々に現れてくるとともに、供試体の応力状態が急激に変化して異方性が発達し始めるためであると考えられる。また、破壊時の中間主応力係数の値については、供試体の密度（相対密度）や拘束圧の大きさによらずほぼ 0.3 前後になっており、上述の非排水せん断試験の結果とも一致し、注目すべき点であると考えられる。なお、せん断開始直後に b 値が一旦下がってから上昇しているが、これは非排水せん断の場合と同様に供試体が等方圧密されているためであり、拘束枠取り付け時の締め付けによる荷重の影響がそのまま現れているためである。

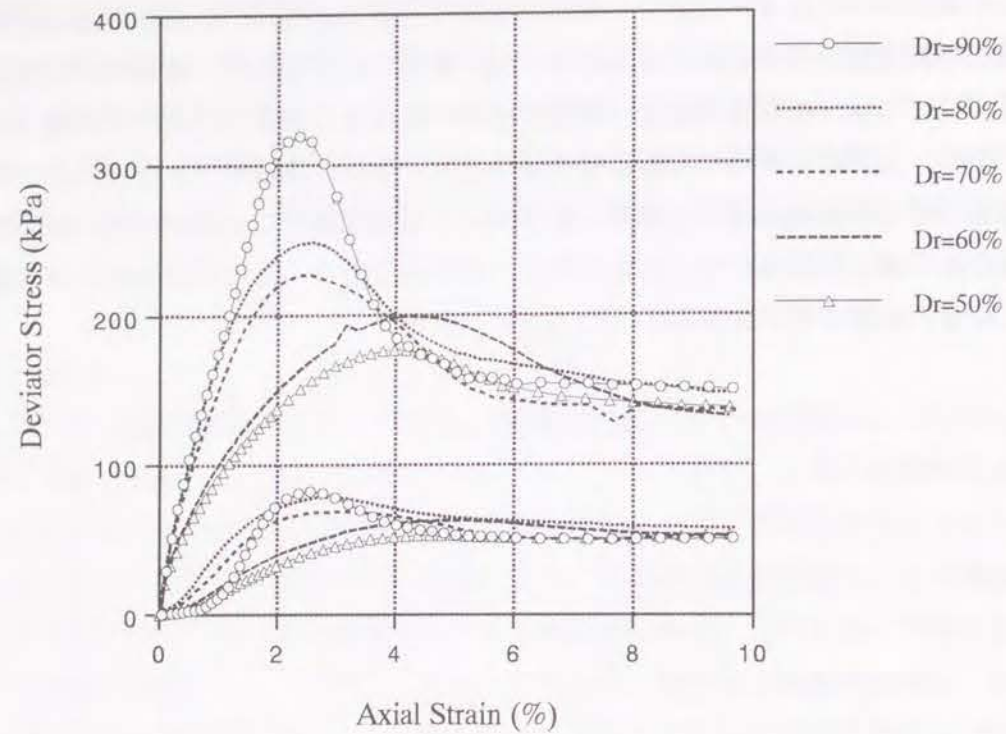


図 5-06 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

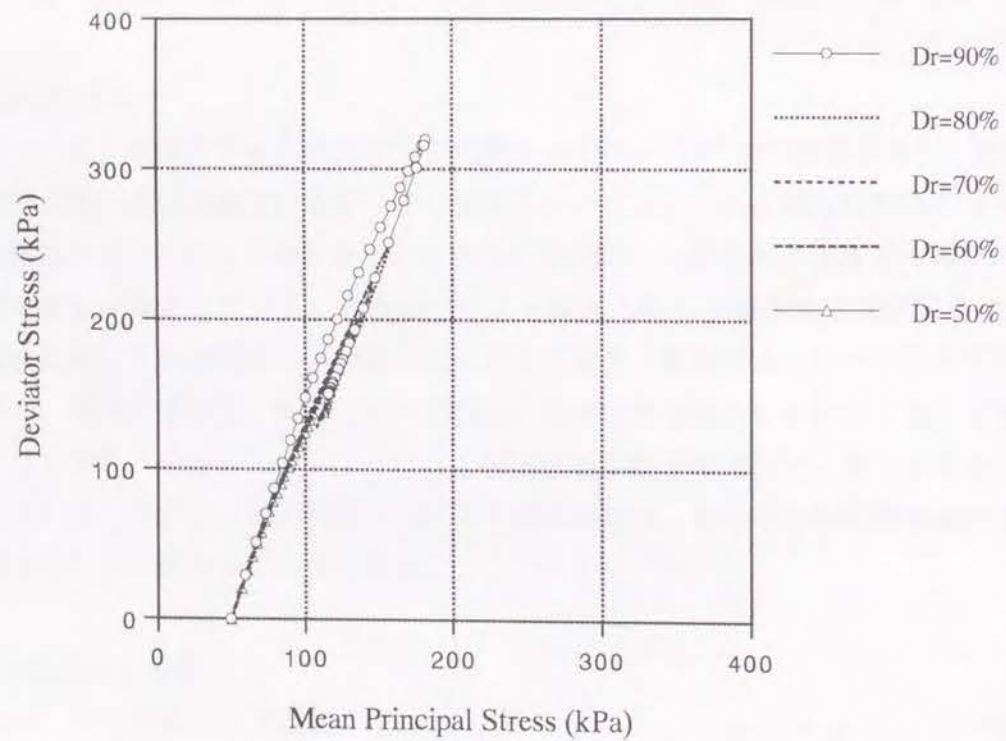


図 5-07 応力径路
(Stress Path)

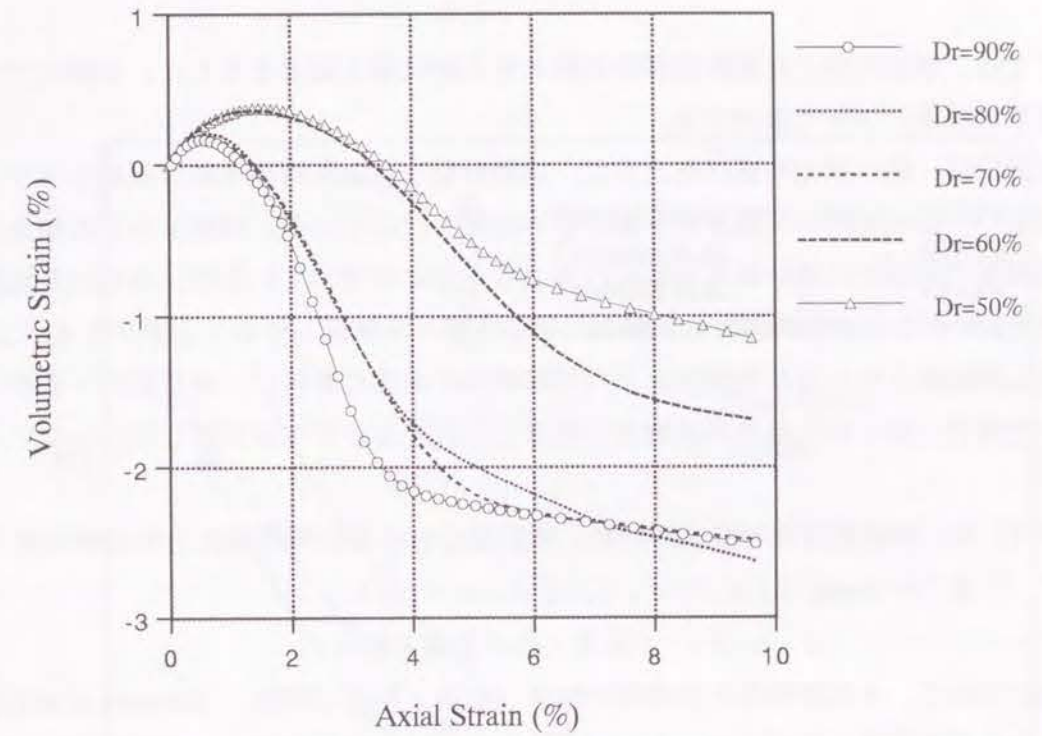


図 5-08 体積ひずみ-軸ひずみ関係
(Volumetric Strain v. s. Axial Strain Relationships)

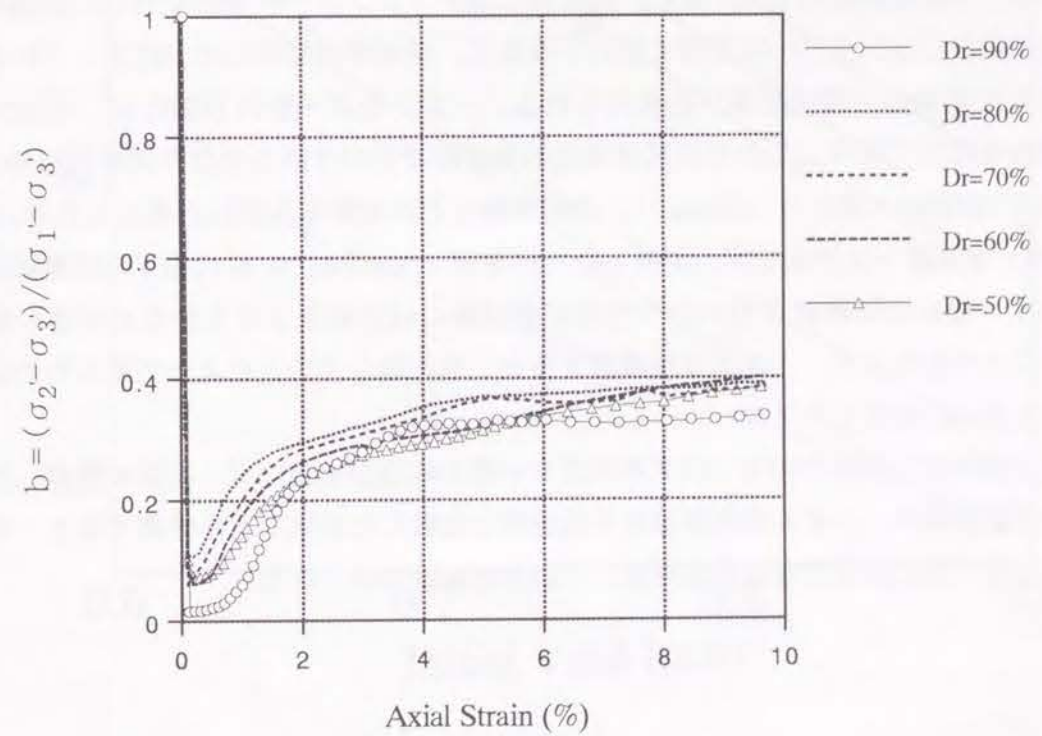


図 5-09 中間主応力係数-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. b-value Relationships)

5.3.3 構築した試験システムによって得られた結果の検討

ここでは、等方圧密した飽和豊浦砂の静的せん断試験の結果をもとに、本研究で用いた試験装置の性能について検討する。

本研究では、第3章でも述べたように、自動計測・自動制御が可能な試験システムを新たに構築し、これを用いて種々の平面ひずみ試験を行っている。試験システム構築の際には、高精度で信頼性の高い結果が得られるよう十分に考慮しているが、得られた試験結果を具体的にいくつかの研究論文と比較し、その信頼性を確認しておく必要がある。よって、静的せん断試験における初期間隙比と内部摩擦角の関係に着目し、同じ試料・条件で試験を行った場合、得られた結果が他機関の結果と一致するかどうか比較した。

図 5-10 は、飽和豊浦砂の排水静的せん断試験における初期間隙比と内部摩擦角

$$\phi' = \arcsin \{ (\sigma_1' - \sigma_3') / (\sigma_1' + \sigma_3') \}$$

σ_1' , σ_3' : 最大・最小有効主応力

の変化について、本試験結果と他機関の結果（市原・松沢 (1970), Tatsuoka *et al.* (1986)）を示したものである。この図で、Tatsuoka *et al.* (1986) の研究は、本研究で用いている試験機を製作する際にも参考にしたものであるが、フローティングタイプの拘束枠を有しており、固定タイプの拘束枠に比べて拘束板と供試体の間に働く鉛直方向の摩擦力分布の影響を小さくできる特長がある。また、拘束板にはテフロンシートを貼り付け、供試体との接触面にはシリコングリースを薄く塗布するなど、端面摩擦軽減に十分注意している点でも得られた結果の信頼性は高いと考えられる。一方、市原・松沢 (1970) は、固定タイプの拘束枠を用いており、しかも供試体は気乾豊浦砂でその寸法もかなり大きく（幅:500mm × 高さ:200mm × 奥行き:120mm）、端面摩擦などの影響も大きいと考えられる。図 5-10 より、本試験システムを用いて得られた結果は、Tatsuoka *et al.* (1986) の試験結果に近く、市原・松沢の試験結果 (1970) や三軸圧縮試験の試験結果よりもかなり大きい結果を与えることがわかるが、上述の点を考慮すると、本試験システムによって得られた結果の信頼性も高いと考えられる。

以上、静的せん断時の応力-ひずみ関係や中間主応力の挙動など、前節で検討したいいくつかの試験結果や、本節の内部摩擦角を他機関と比較した結果などを考慮すると、本試験システムは十分に満足できる性能を有していると結論づけられる。

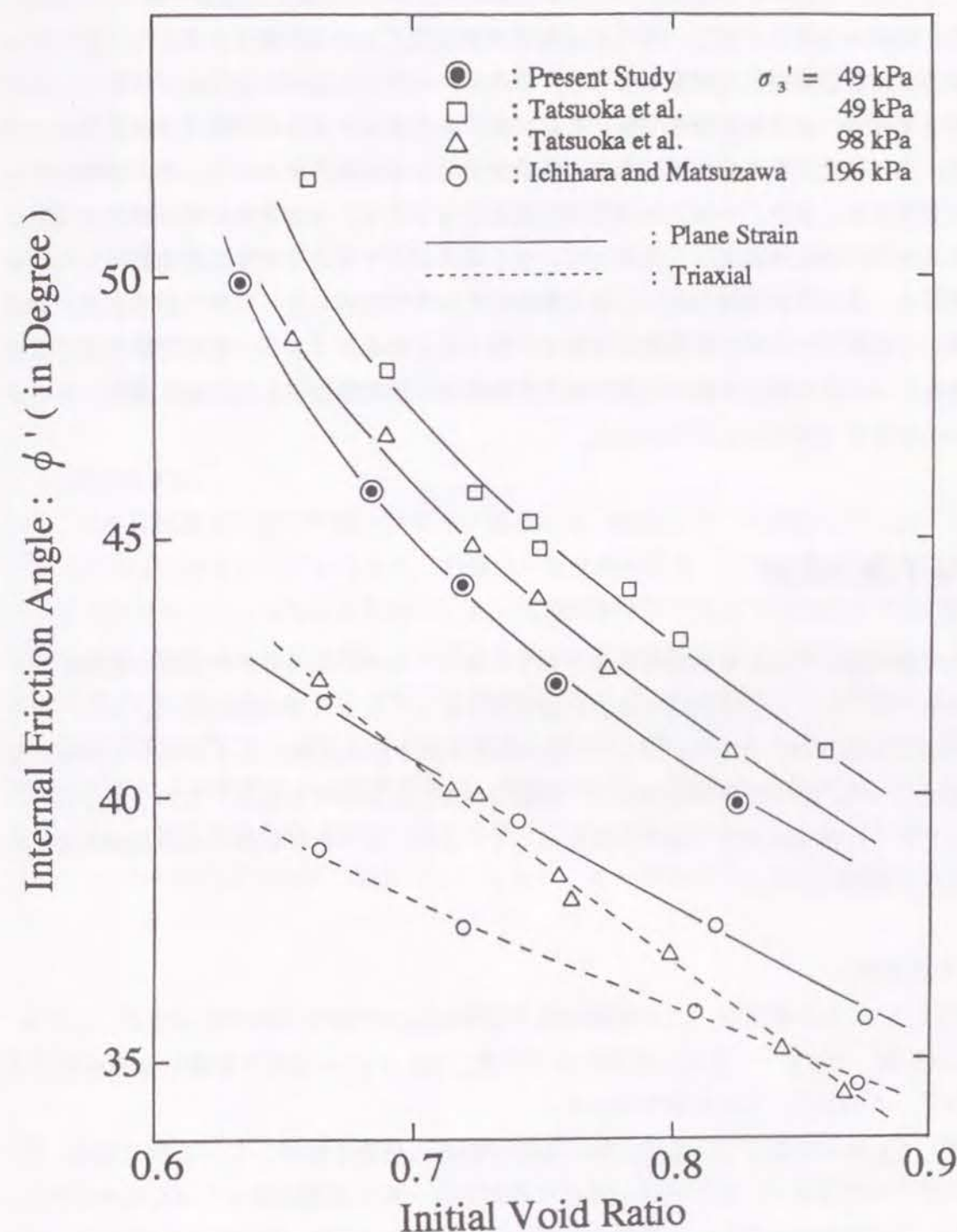


図 5-10 初期間隙比と内部摩擦角の関係

(Relationship between Internal Friction Angle and Initial Void Ratio)

5.4 異方圧密静的せん断挙動

前節までは、平面ひずみ条件における砂の基本的な静的せん断特性を調べることに、また、構築した試験システムによって得られた結果を他機関のものと比較することなどを目的として等方圧密試験を用いて試験を行った。しかし、前節でも述べたように、平面ひずみ状態を考える場合、異方圧密状態（特に K_0 状態）を基準とするのが本質的であるため、ここでは、異方圧密された飽和豊浦砂の非排水静的せん断試験の結果について、試験結果をもとに考察する。また、一口に異方圧密状態とは言っても、その状態に至るまでの径路には様々な場合が考えられる。したがって、せん断前に行う異方圧密も圧密径路をいくつか変えて行い、異方圧密履歴の違いによる影響についても検討した。なお、砂のように透水性の高い土の静的せん断挙動を調べる場合、排水せん断を行うのが一般的であるが、後に行う飽和砂の非排水繰返し載荷試験や粘土の静的せん断試験などとの比較も考え、排水・非排水の両条件で静的せん断を行った。

5.4.1 異方圧密

異方圧密に関しては K_0 圧密を基本としているが、上述のように圧密履歴の影響についても考察するため、圧密終了時の応力状態は同一とし、 K_0 圧密径路の他に、 p' 一定の応力径路で排水圧縮したものと σ'_3 一定の応力径路で排水圧縮したものの計3種類の異方圧密を行った。異方圧密の方法など、詳細は前述したとおりである。なお、以下の図にはここで行った異方圧密の代表的な例を示しているが、用いた供試体の初期相対密度は59%~65%の範囲である。

(1) 応力径路

図5-11に、本研究で行った3種類の異方圧密の応力径路をそれぞれ示した。ここで、(a): K_0 圧密、(b): p' 一定応力径路による圧密、(c): σ'_3 一定応力径路による圧密であり、以下、この表記による分類を用いる。

まず、(a): K_0 圧密については、特に圧密中の応力状態を制御している訳ではないが、初期の平均有効主応力一定の径路の後にはほぼ応力比一定の直線になっているのがわかる。これは、今回考慮の対象とした通常の圧密圧力レベルでは、 K_0 値がほとんど変化しないことを表すものと考えられる。実際、予備試験によって求められた K_0 値を用いて応力比一定($K=0.39$)での異方圧密も行っているが、側方ひずみの変動は±0.008%以下であ

った(図5-13参照)。また、(b): p' 一定応力径路による圧密、(c): σ'_3 一定応力径路による圧密については、応力径路の制御が良好であったことを示している。

(2) 応力-ひずみ関係

図5-12には異方圧密の応力-ひずみ関係を示した。(a)に関しては、初期の平均有効主応力一定の排水過程以降は、供試体の側方ひずみが生じないように軸圧を増加させるとともに側圧もこれにあわせて増加させるため、応力-ひずみ関係は下に凸の曲線となっているのがわかる。また、中間主応力は圧密中その大きさがほとんど変化していないが、これは K_0 圧密(側方ひずみが生じないような圧密)を行っているためであり、逆に、制御が良好であったことを示すものでもある。(b)に関しては、平均有効主応力を一定に保つよう側圧を減少させているため、軸差応力の立ち上がりはやや緩やかであり、中間主応力の発達も比較的小さい。(c)に関しては、通常の等方圧密排水せん断の初期部分と同じであり、軸差応力の立ち上がりや中間主応力の発達などについても同様である。

(3) 側方ひずみ

図5-13には異方圧密中の側方ひずみ-偏差応力(軸差応力)の関係を示した。(a)に関しては K_0 圧密を行っているため、初期の平均有効主応力一定の排水過程以降は側方ひずみの変動はほとんどないのがわかる。 K_0 圧密制御プログラムでは側方ひずみの許容変動量を±0.005%としているが、この図より K_0 圧密の制御が良好に行われていることが確認できる。一方、(b)や(c)では、圧密が進行するにつれて側方ひずみは増大し、軸ひずみにほぼ比例するように側方ひずみも増大している。軸ひずみに対する側方ひずみの増加割合は供試体の密度によって異なるが、密度が大きいものほどその増加割合も大きい。なお、 p' 一定の応力径路で異方圧密する場合には圧密の進行とともに側圧も減少させるため、 σ'_3 一定の応力径路で異方圧密する場合よりも側方ひずみの増加割合も大きくなる。

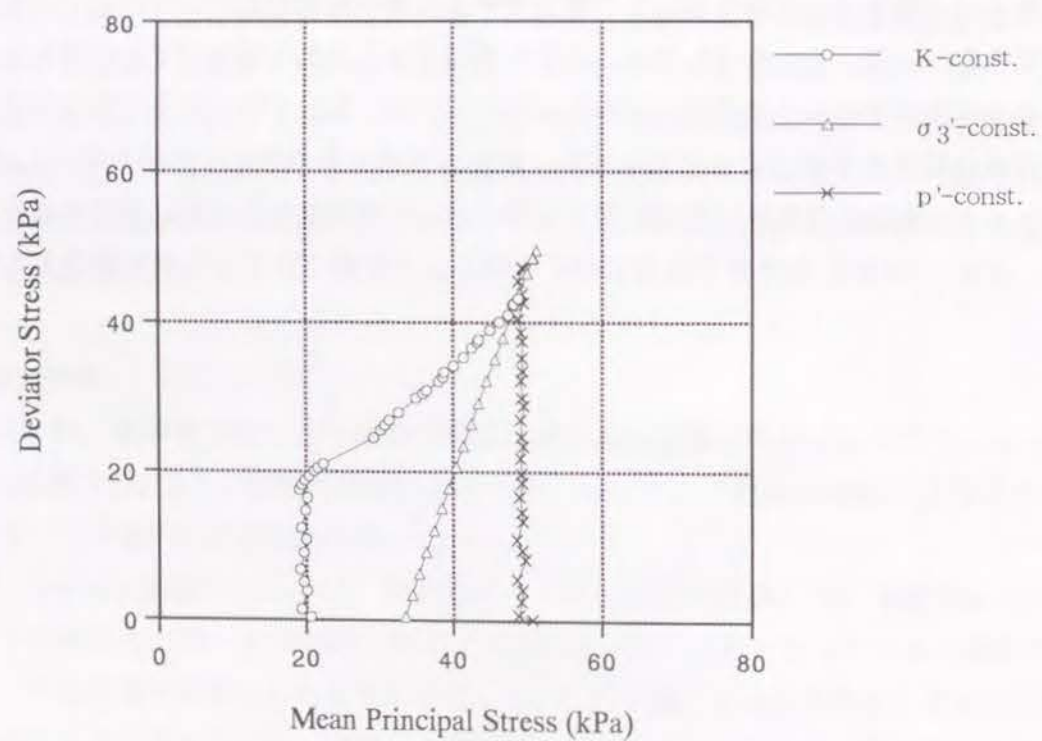
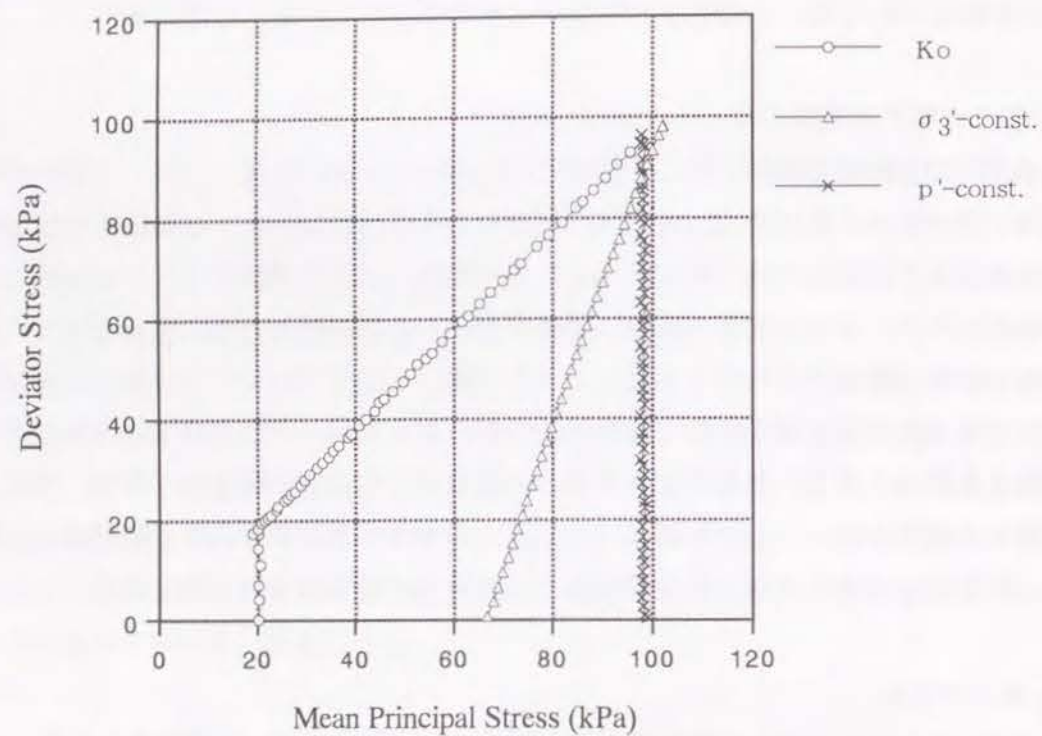


図 5-11 異方圧密応力径路
(Stress Path for Anisotropic Consolidations)

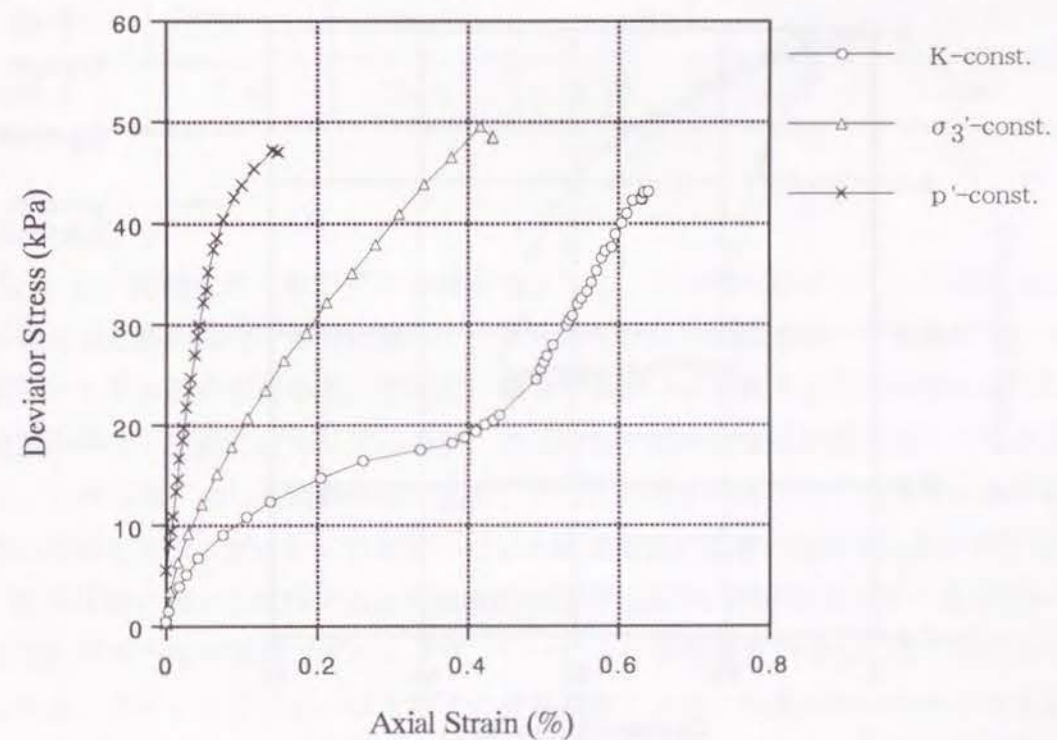
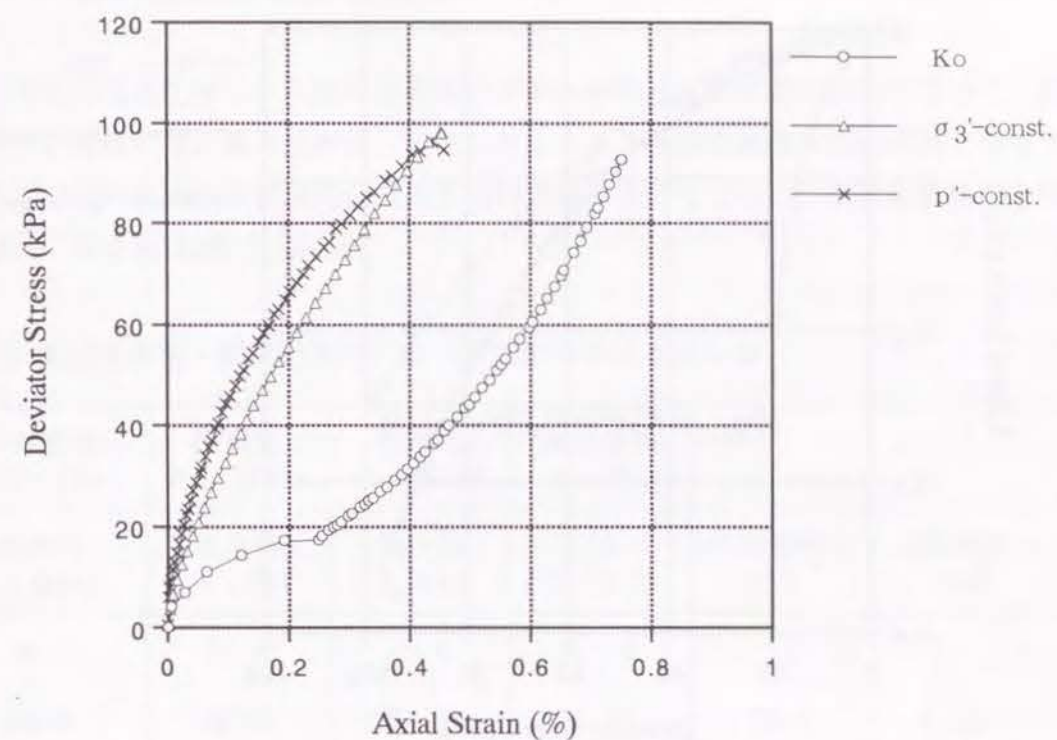


図 5-12 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

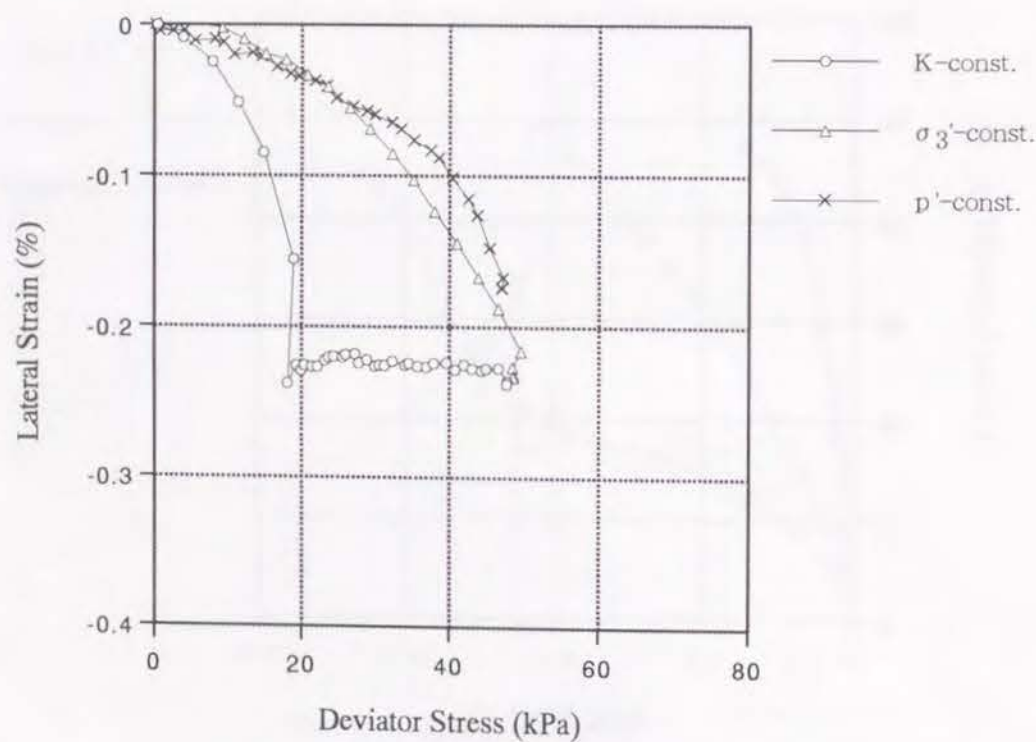
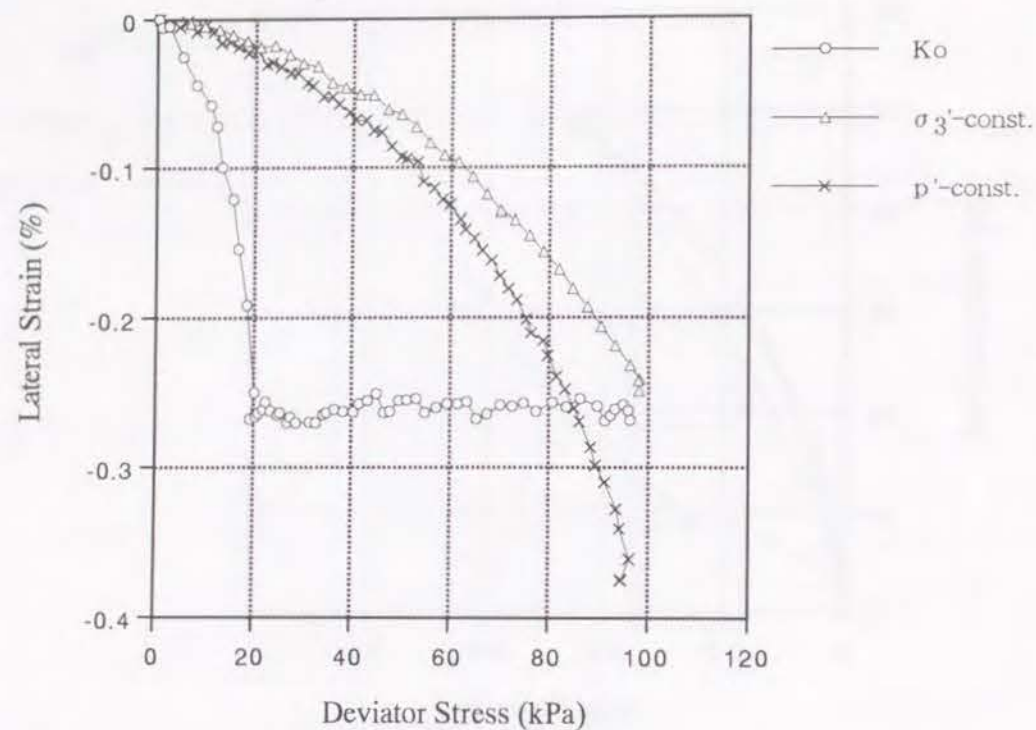


図 5-13 側方ひずみ—偏差応力関係
(Deviator Stress v. s. Lateral Strain Relationships)

5.4.2 異方圧密非排水せん断

ここでは、異方圧密された飽和豊浦砂の非排水静的せん断試験の結果について、試験結果をもとに考察する。異方圧密は、上述したような3種類の異なる圧密径路で行っているが、ここではそれぞれの代表的な結果を用いて検討を行っている。供試体条件ならびに試験結果の一覧を表 5-03 に示した。

表 5-03 供試体条件・試験結果の一覧 (異方圧密非排水せん断)

相対密度 D_r (%)	拘束圧 σ_{30}' (kPa)	拘束圧 p_0' (kPa)	圧密径路 (一定)		
破壊時 q (kPa)	破壊時 ε_1 (%)	最小値 u (kPa)	M (q/p') _f	内部摩擦角 ϕ' (°)	破壊時 b 値
64.5	31.4	49.0	K一定		
937.9	6.26	-271.5	1.40	38.9	0.247
61.2	32.3	51.0	σ_3' 一定		
799.7	6.72	-249.9	1.34	37.1	0.246
59.9	31.4	49.0	p' 一定		
998.6	7.06	-229.3	1.53	42.8	0.256

(1) 間隙水圧

図 5-14 に、間隙水圧—軸ひずみの関係を示した。この図を見ると、正の間隙水圧が発生するのはせん断初期の一部分に過ぎず、ほとんどが負の間隙水圧、それもかなり大きな負の値をとっているのがわかる。さらに、軸ひずみが7%を越えるとせん断は進行していても間隙水圧は一定値に収束しているが、この段階で試料は限界状態に達していると判断できる。これらは、用いた試料が砂であり、かつ、非排水条件でせん断しているため、等方圧密の場合と同様にダイレイタンスによる体積膨張が顕著に現れたためと考えられる。また、等方圧密の場合と比較すると間隙水圧の低下の度合いがかなり大きくなっているが、これは試料の異方性の関係でダイレイタンスによる体積膨張がさらに強く現れたものと考えられる。ダイレイタンスは土粒子の骨格構造に大きく影響されるものであるが、これらの結果より、異方圧密されると土粒子の噛み合わせが密になることを示しているものと思われる。なお、圧密径路の違いによる影響については供試体の相対密度が試験によっ

ていくぶん異なっているため明確な断言はできないが、限界状態における収束値が、(c) $p' \rightarrow$ 一定 \rightarrow (b) $\sigma_3' \rightarrow$ 一定 \rightarrow (a) K 一定の順に小さくなっていく傾向があるようにみえる。

(2) 応力-ひずみ関係

図 5-15 に、軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$) および中間主応力 ($\sigma_2' - \sigma_3'$) と軸ひずみの関係を示した。この図を見ると、軸差応力・中間主応力ともに、せん断の進行とともにやや下に凸の曲線を描きながら増大しているのがわかる。これは、上述の間隙水圧の影響が大きく出ているものと考えられる。すなわち、せん断が進行するにつれ、ダイレイタンシーによる負の間隙水圧の増大のため有効拘束圧が増大して試料の見かけの剛性が高まるためであると考えられる。また、ピークの現れ方が明確であり、その時の軸ひずみの値から判断すると間隙水圧も一定値に収束していることから、ピーク強度と限界状態は一致しているものと判断できる。さらに、中間主応力についてもその増減の様子が軸差応力のそれとほぼ一致していることが確認できる。これらの傾向については、前述の等方圧密非排水せん断と同様であり、砂の非排水せん断の特徴であると考えられる。しかし、ピーク強度時について比べた場合、その大きさは異方圧密した場合の方が等方圧密の場合よりもかなり大きくなっており、その時の軸ひずみは異方圧密の方が小さいのがわかる。これらは圧密条件に起因する違いであり、異方圧密の効果であると考えられる。なお、供試体の密度が大きくなるほどピーク強度が大きく、その現れ方も顕著になる点などについては、等方圧密の場合と同様である。しかしその一方で、異方圧密径路の違いによる影響は明確にはみられず、供試体の密度による影響の方が大きいようである。

(3) 応力径路

図 5-16 には、応力径路を示した。ただし、縦軸は偏差応力 (= 軸差応力: ($\sigma_1' - \sigma_3'$))、横軸は平均有効主応力 ($(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') / 3$) である。これらの図を見ると、等方圧密の場合と同様に、応力径路は供試体の初期間隙比によらず (相対密度によらず) ほぼ相似形であり、せん断開始直後は軸差応力が主に増大し、その後は応力比一定の直線に漸近しながらそのままピーク強度に至っている。応力径路がこのような形状になるのはやはり、負の間隙水圧が大きく発生しているためであると考えられる。なお、限界状態における応力比の値 (M) は等方圧密の場合とほぼ同じ 1.4~1.5 程度であり、 M が土固有のパラメータであることを示していると考えられる。また、異方圧密径路の違いによる影響はほとんどみられなかった。

(4) 中間主応力係数

図 5-17 に、中間主応力係数 ($b = (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$) と軸ひずみの関係を示した。これらの図を見ると、中間主応力係数の値は、異方圧密径路の違いによ

らずせん断開始後速やかに 0.2~0.3 程度まで増大し、その後はほぼ一定の大きさを保ちながら破壊に至っているのがわかる。また、破壊時の中間主応力係数の値については、供試体の密度や拘束圧の大きさによらずほぼ 0.25~0.30 になっており、値は等方圧密の場合と多少異なるものの、平面ひずみ条件特有のものとして注目すべき点であると考えられる。異方圧密と等方圧密とでは、圧密終了時の供試体の土粒子構造は大きく異なっているものと考えられるが、中間主応力に関するこれらの性質が圧密条件によらず非常に似通っている点は、平面ひずみ条件における土の挙動を考える上で注目すべき点であると考えられる。

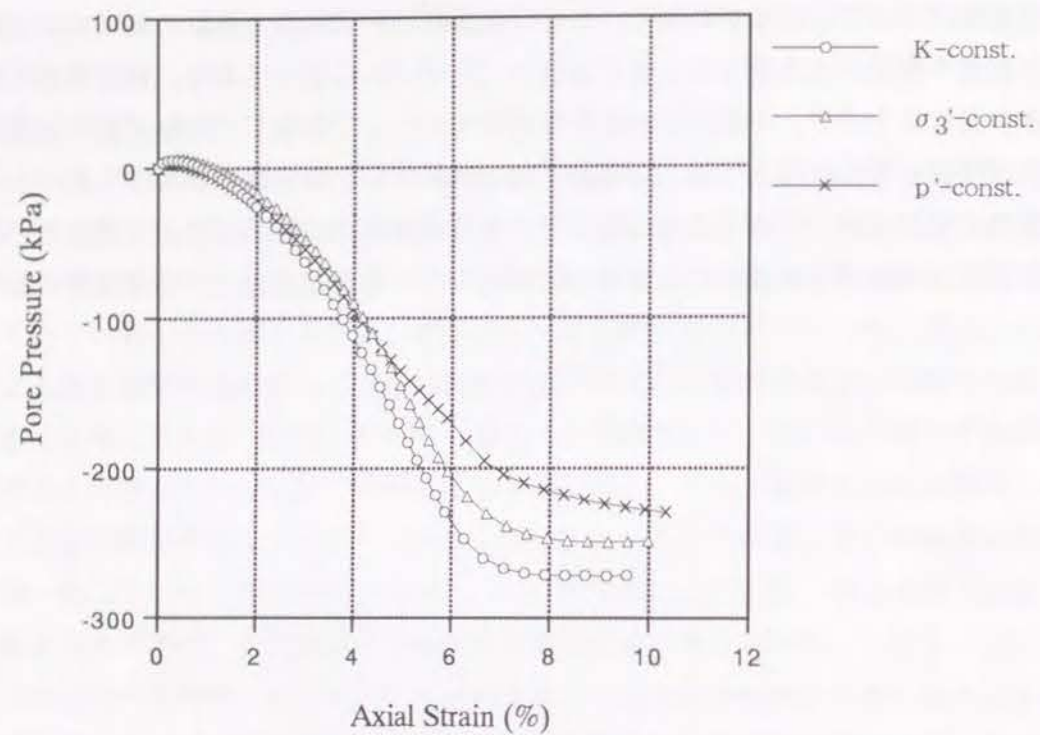


図 5-14 間隙水圧-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Pore Pressure Relationships)

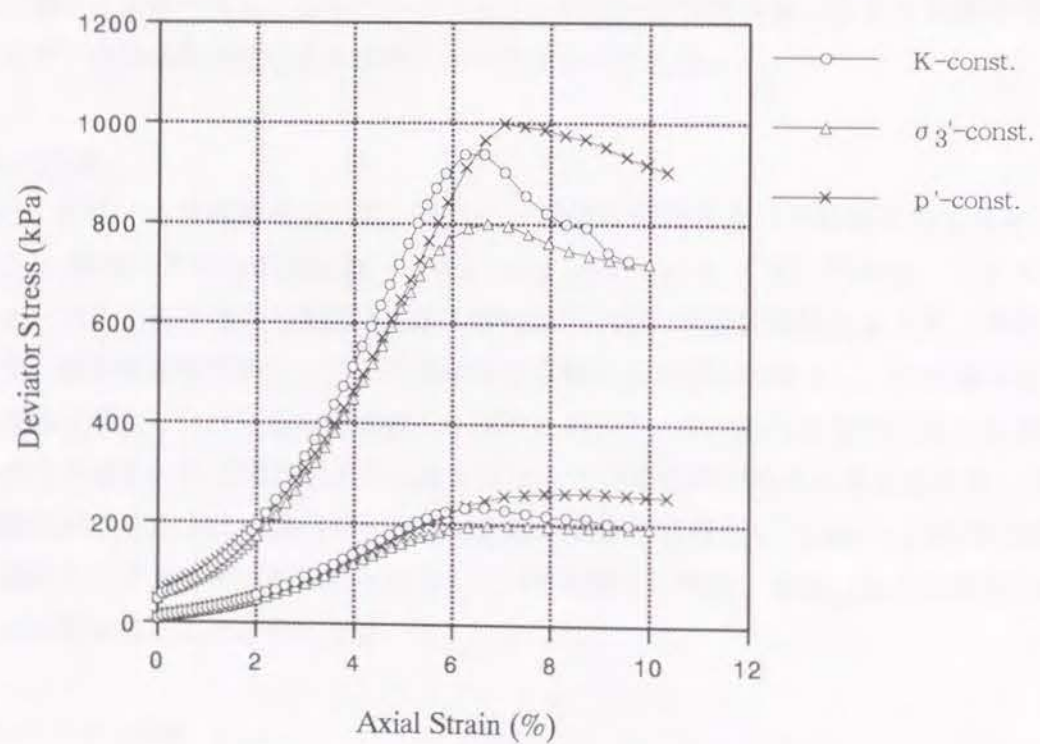


図 5-15 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

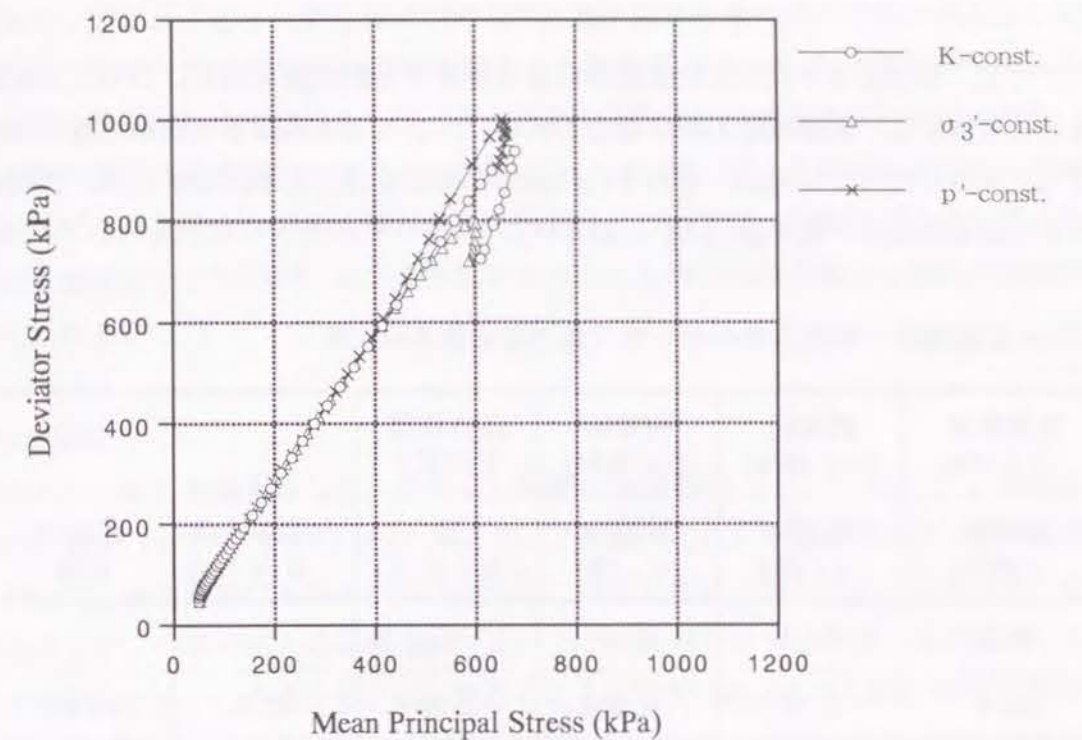


図 5-16 応力径路
(Stress Path)

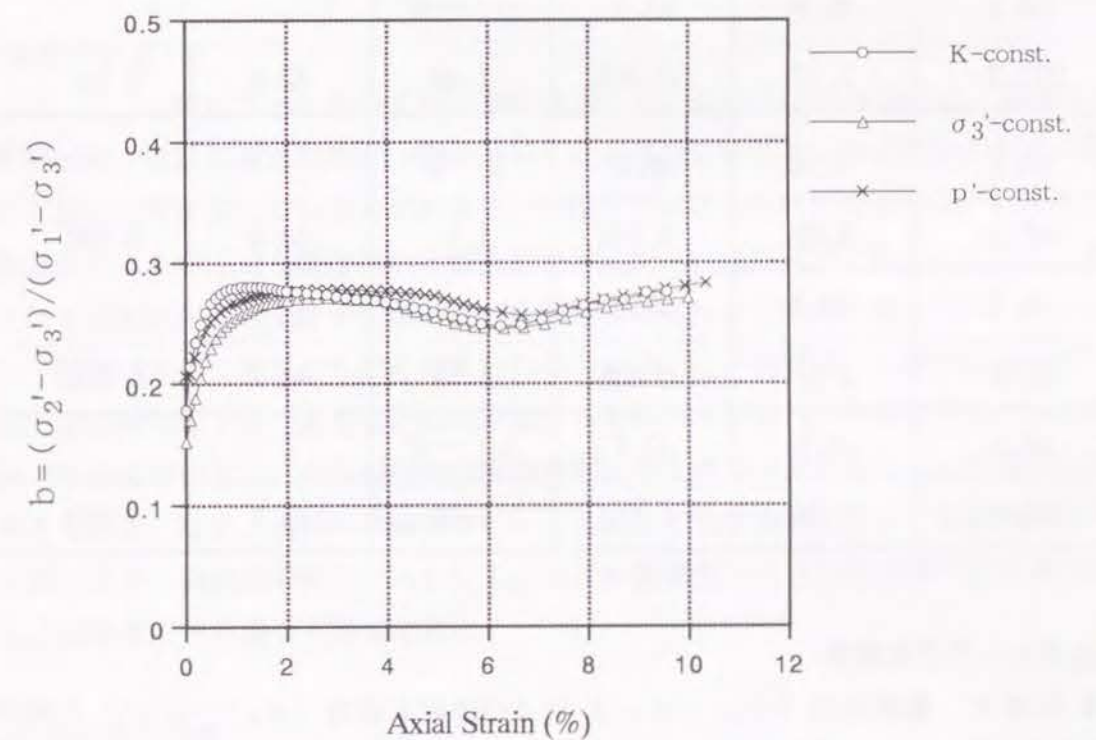


図 5-17 中間主応力係数-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. b-value Relationships)

5.4.3 異方圧密排水せん断

ここでは、異方圧密された飽和豊浦砂の排水静的せん断試験の結果について、試験結果をもとに考察する。非排水せん断の場合と同様に、ここでも異なる3種類の異方圧密径路によって圧密を行っているが、それぞれ代表的な結果を用いて検討している。供試体条件ならびに試験結果の一覧を表 5-04 に示した。

表 5-04 試験条件・供試体条件の一覧（異方圧密排水せん断）

相対密度 D_r (%)	拘束圧 σ_{30}' (kPa)	拘束圧 p_0' (kPa)	圧密径路 (一定)		
破壊時 q (kPa)	破壊時 ε_1 (%)	破壊時 ε_v (%)	M (q/p') _f	内部摩擦角 ϕ' (°)	破壊時 b 値
66.3	62.1	95.6	K ₀		
266.6	2.91	0.664	1.48	42.6	0.310
65.3	65.4	98.1	σ_3' 一定		
271.5	2.91	0.144	1.47	42.5	0.315
66.3	62.9	94.8	p' 一定		
271.5	2.57	0.494	1.49	42.8	0.311
68.2	31.8	48.8	K一定		
147.0	3.08	0.875	1.51	43.3	0.299
70.2	32.3	49.9	σ_3' 一定		
150.9	2.67	0.835	1.53	44.5	0.323
67.5	31.8	47.8	p' 一定		
152.9	2.59	1.013	1.56	43.9	0.289

(1) 応力-ひずみ関係

図 5-18 に、軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$) および中間主応力 ($\sigma_2' - \sigma_3'$) と軸ひずみの関係を示した。この図を見ると、非排水せん断の結果とは異なり、軸差応力・中間主応力ともに上に凸のカーブを描いているのがわかる。等方圧密の場合と比較すると全体的な

形状は似ているが、せん断開始直後の軸差応力・中間主応力の立ち上がりが急である点が大きく異なっており、ピーク強度までの軸ひずみ量も異方圧密の方がやや小さくなる傾向が見られる。強度については、異方圧密であるため側圧 (σ_3') の大きさをそのまま比較の対象としてよいかの問題はあるが、等方圧密の場合よりも多少大きい程度であり、非排水せん断の場合のようなそれほど大きな差はない。なお、ピークの現れ方やピーク強度までの軸ひずみの大きさなど供試体の密度との関係については、試験数があまり多くないため明確な言及はできないが、異方圧密試料についても等方圧密の場合と同様の傾向があると考えられる。

(2) 応力径路

図 5-19 に、応力径路を示した。ただし、縦軸は軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$)、横軸は平均有効主応力 ($(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') / 3$) である。これらの図を見ると、等方圧密の場合と同様に、応力径路は試験時の拘束圧のみに依存する相似形となり、ほぼ傾き一定の直線ではあるが、中間主応力の影響でわずかに上に凸の形状を示しながら最大強度に到達しているのがわかる。この場合も、応力径路の傾きは等方圧密排水せん断の場合と同様に、中間主応力の影響によって軸対称三軸条件での値である 3.0 よりも多少小さい値となっている。また、破壊時の応力比 (q/p') については、等方圧密とほぼ同じ 1.5 程度であるが、同じ密度の試料で比較すると多少大きくなる傾向がある。

(3) 体積ひずみ

図 5-20 に、体積ひずみと軸ひずみの関係を示した。これらの図を見ると、供試体は、せん断開始後一旦は圧縮されるが、その後ダイレイタンスによる体積膨張が大きく進行しながら最大強度に至っているのがわかる。体積ひずみの全体的な増減の様子は等方圧密の場合と似ているが、せん断初期の圧縮量が非常に小さい点が注目される。これは、異方圧密されると供試体内の土粒子の噛み合わせが密になるためであると考えられ、ダイレイタンス特性が大きく異なるものと考えられる。また、この性質は、上述の応力-ひずみ関係で初期接線勾配が急であることにも対応するものと考えられ、拘束圧が大きいものほど初期の圧縮量が小さく、最終的な体積膨張量が大きな値で収束することにも関係していると考えられる。なお、供試体の強度がピークを越えて残留強度に至っても体積膨張がしばらく続く点や、供試体の密度が大きいものほど体積膨張が大きな値で収束する傾向がある点などは等方圧密の場合と同様である。

(4) 中間主応力係数

図 5-21 に、中間主応力係数 ($b = (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$) と軸ひずみの関係を示した。これらの図を見ると、中間主応力係数の値はせん断開始後速やかに 0.3

程度まで急増し、その後はわずかに増加しながら破壊に至っているのがわかる。b 値が急増するのは供試体の体積ひずみが一旦増加して減少に転じ始める辺りまでであり、ダイレイタンスによる体積膨張が徐々に現れてくる辺りまでである点は等方圧密の場合と同じ傾向である。しかし、圧密によって供試体がすでに異方状態にあるため、上述の応力-ひずみ関係などのように中間主応力係数の増加が収束傾向に至るまでの軸ひずみ量は等方圧密のそれよりも小さくなる傾向がある。また、破壊時の中間主応力係数の値については、供試体の密度や拘束圧の大きさによらずほぼ 0.3 前後になっており、上述の非排水せん断試験の結果や等方圧密試験を用いた結果とも一致し、注目すべき点であると考えられる。

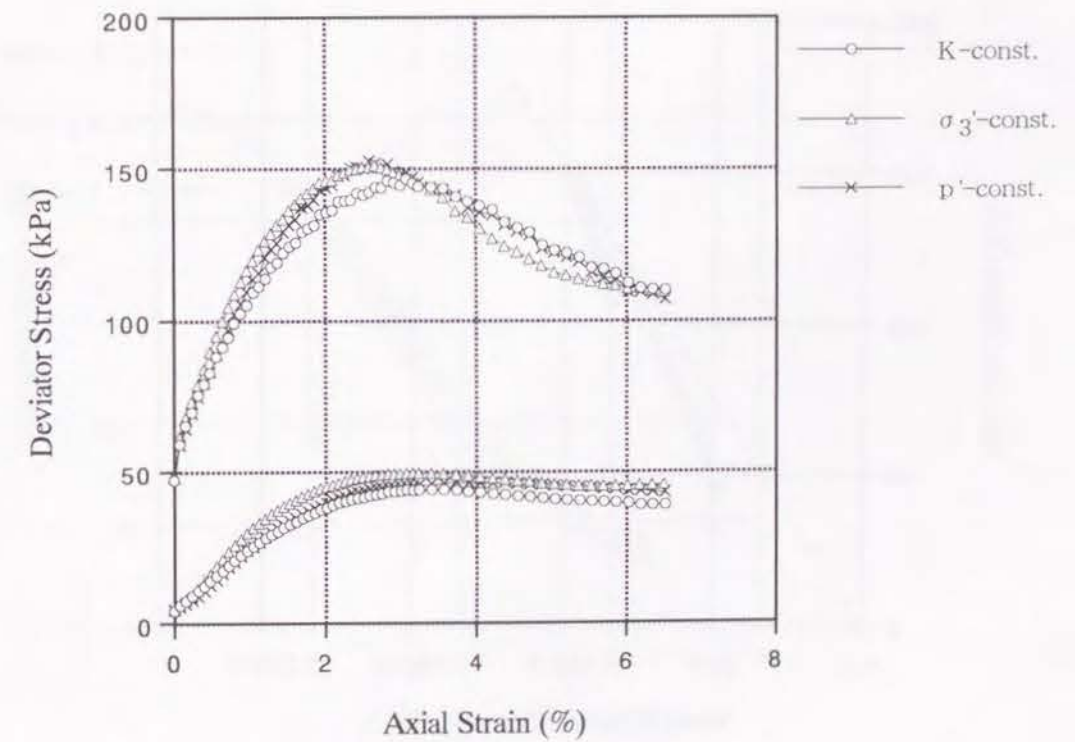
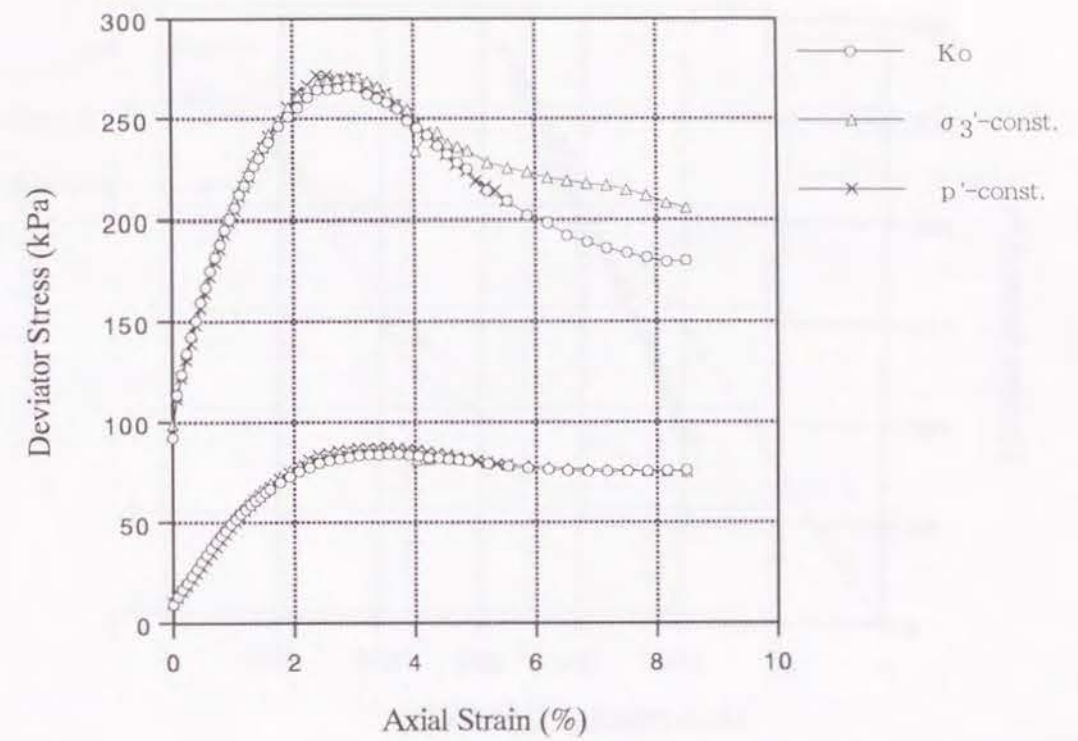


図 5-18 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

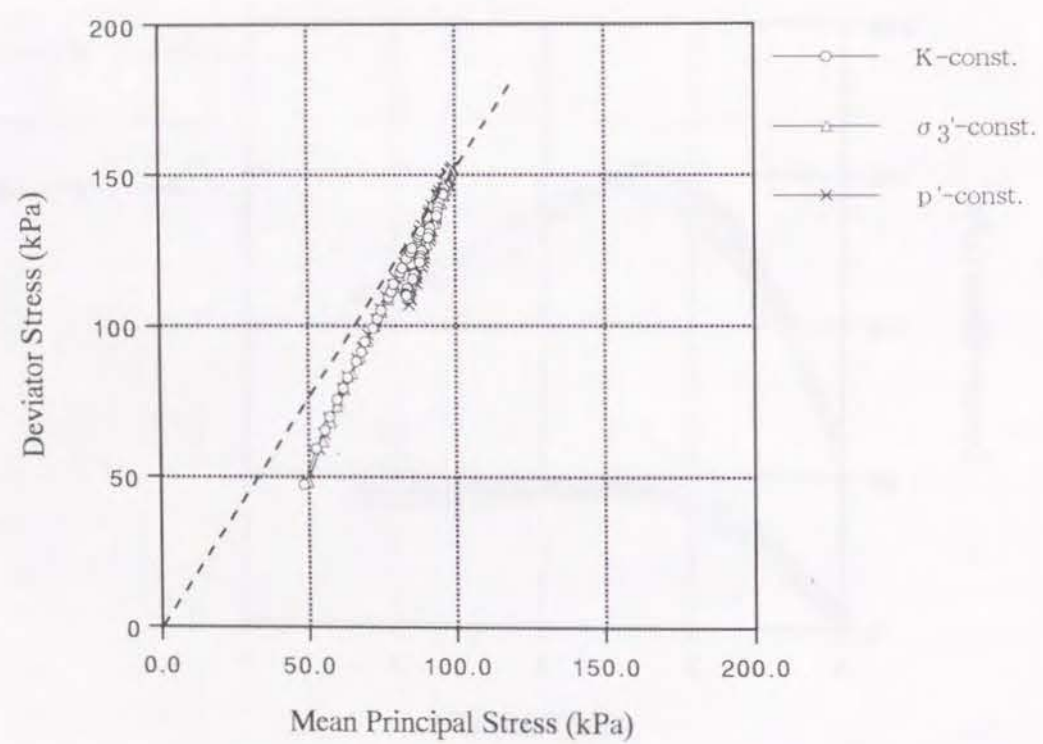
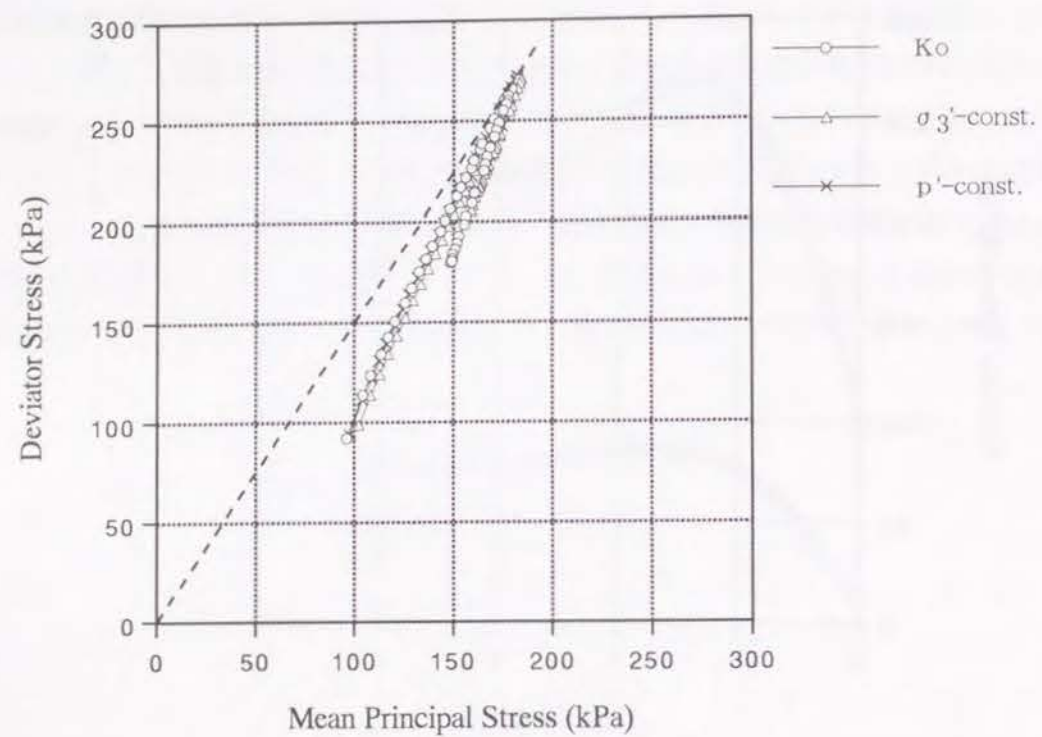


図 5-19 応力径路
(Stress Path)

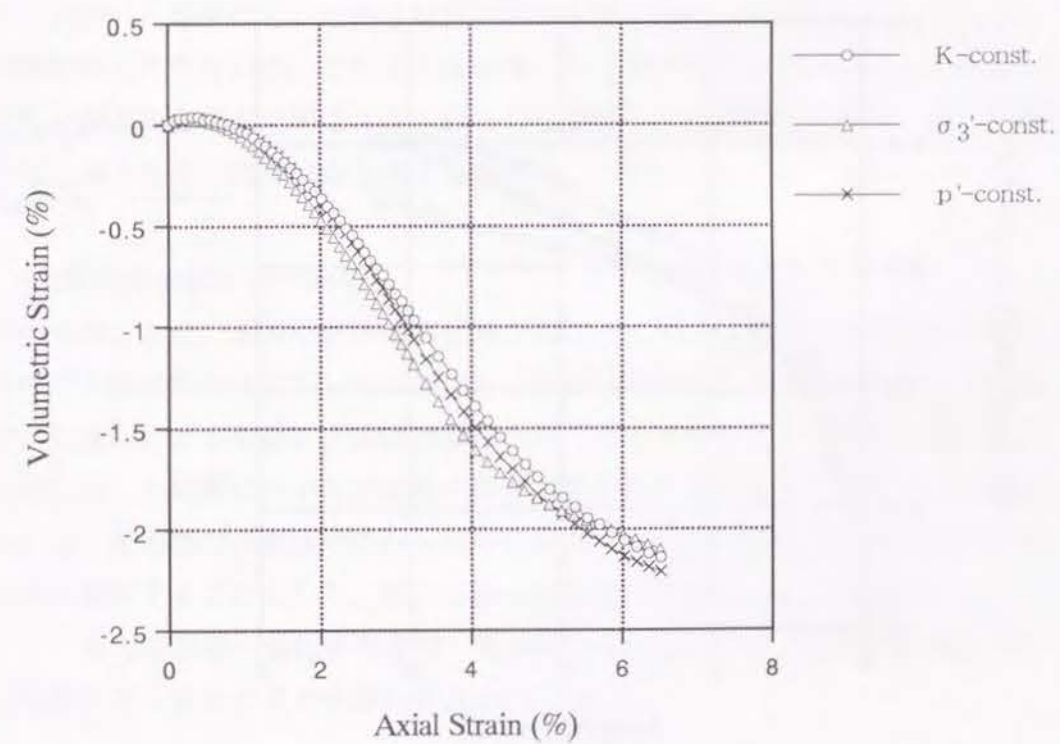
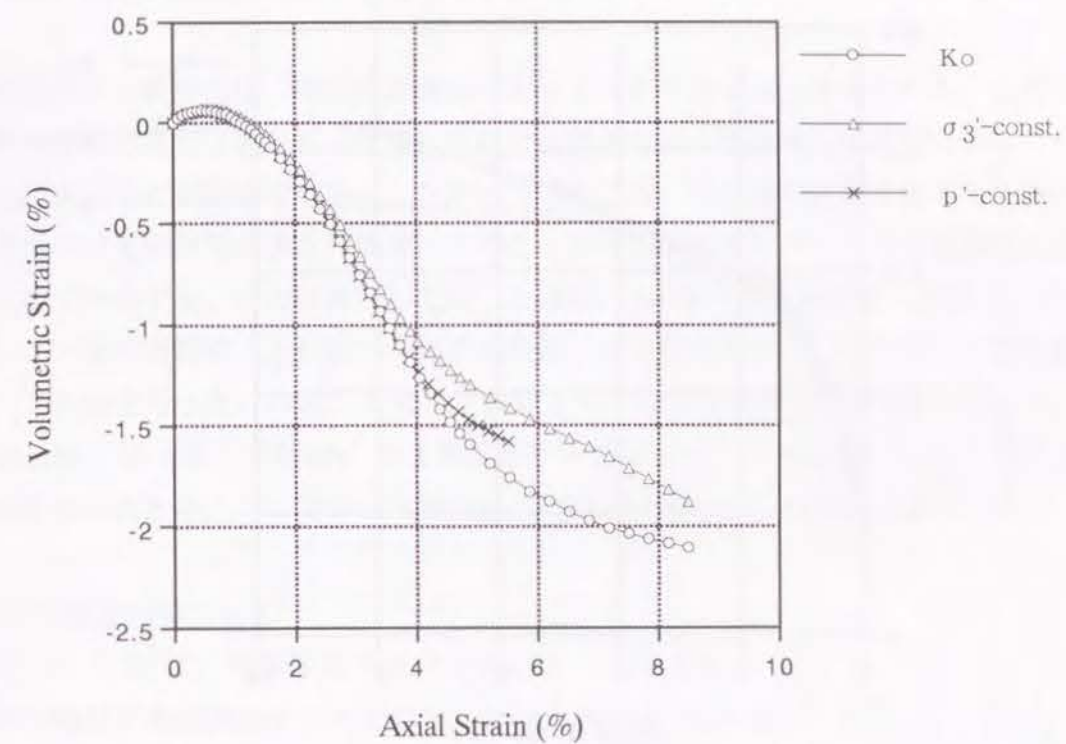


図 5-20 体積ひずみ-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Volumetric Strain Relationships)

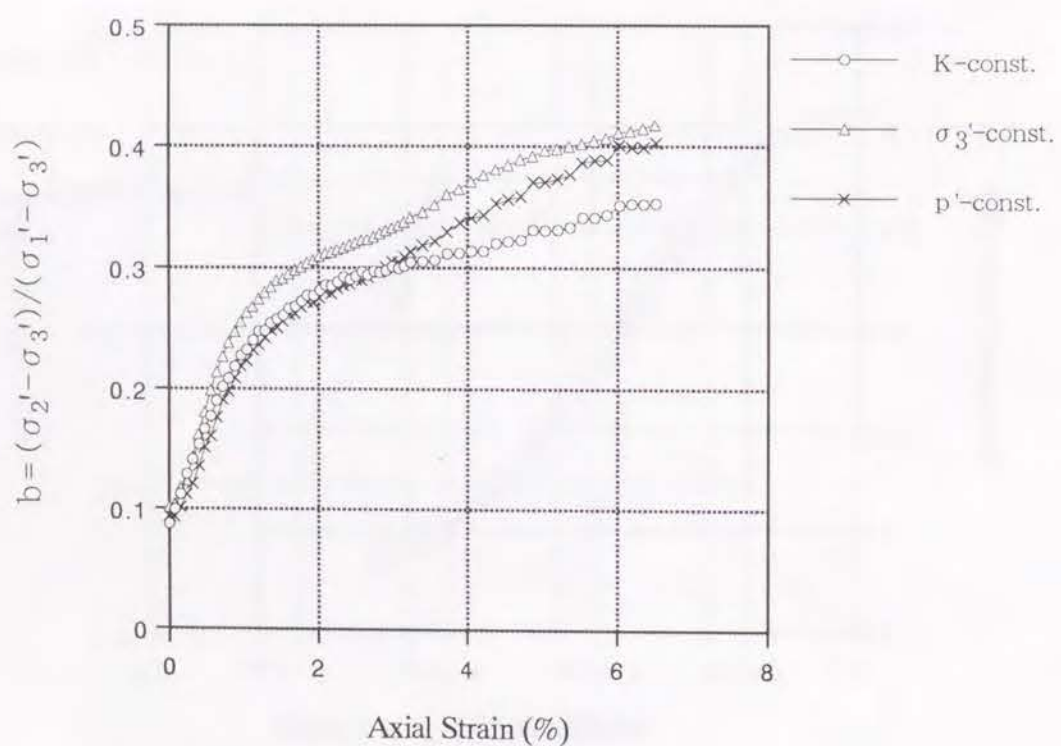
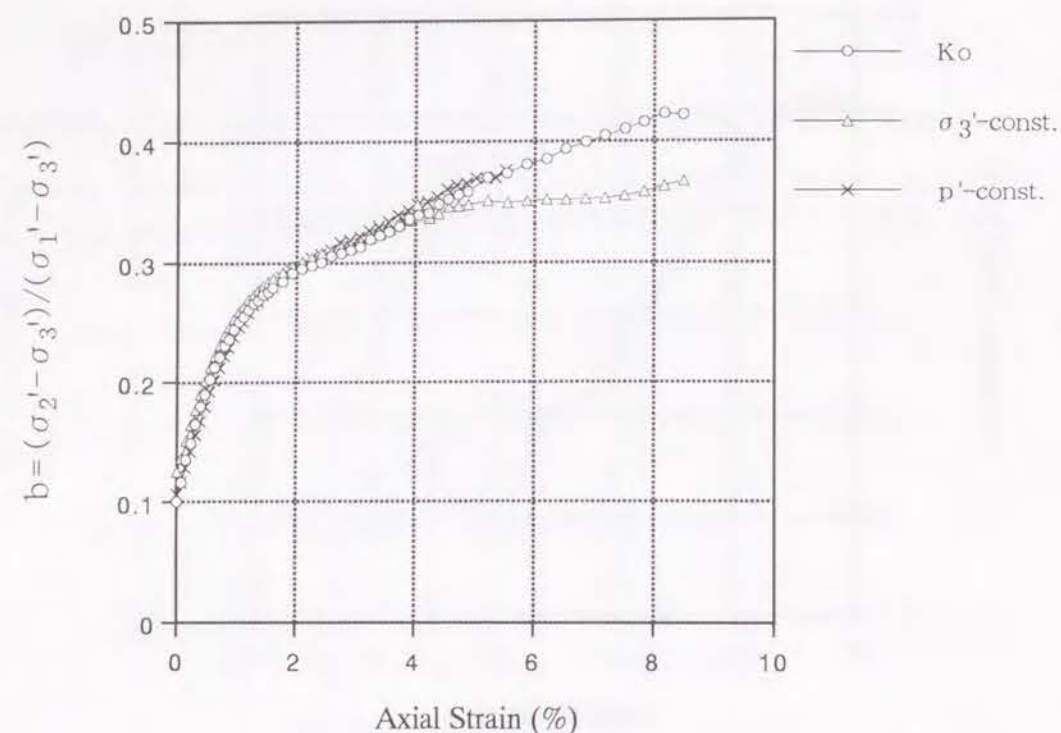


図 5-21 中間主応力係数—軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. b-value Relationships)

5.4.4 圧密履歴の違いが及ぼす影響について

供試体のせん断特性は、その粒子構造によって大きく異なると考えられる。上述のように、等方圧密と異方圧密 (K_o 状態) された供試体では、そのせん断特性にいくつかの違いが存在することが確認できる。したがってここでは、同じ異方圧密状態でも圧密の応力経路が違う (圧密履歴が違う) 場合、このことがせん断特性にどのような影響を及ぼすのかについて考察する。応力経路としては、上述の、(a) K 一定排水経路 (ほぼ K_o 圧密)、(b) σ_3' 一定排水経路、(c) p' 一定排水経路、の3種類を考え、圧密後の応力状態は同一として比較を行った。なお、実施した試験としては異方圧密後の平均有効主応力: p' が、49 kPa, 98 kPa, 196 kPa の3種類を行っているが、 p' の違いによる差はあまり見られなかったため、ここでは $p' = 98$ kPa のものを代表例として取り上げる。

(1) せん断全体について

図 5-22, 5-23 に、軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$)・中間主応力 ($\sigma_2' - \sigma_3'$) および体積ひずみと軸ひずみの関係をそれぞれ示した (上述の図 5-18 および図 5-20 と同じ)。これらの図で、「○, △, ×」の印をつけたものがそれぞれ (a): K 一定経路、(b): σ_3' 一定経路、(c): p' 一定経路で異方圧密したものに対応しているが、前項ですでに検討したように、圧密経路の違いによる差は軸差応力・中間主応力・体積ひずみの挙動ともにほとんど見られない。本来なら、これらは異方圧密履歴が異なるためにいくらかの違いが生じていてもおかしくはないが、このような結果になった理由としては、せん断変形の進行による土粒子構造の変化が圧密によるそれよりも卓越し、圧密経路の違いによる影響が打ち消されてしまったのではないかと考えられる。

(2) せん断初期の部分について

上述の考察により、異方圧密の応力経路が異なっても、圧密後の応力状態が同じであれば、静的せん断挙動全体についてはほとんど差が生じないことがわかった。これは、異方圧密履歴の違いによる影響が非常に微妙なものであることを示していると考えられる。さらに、上図に示した試験に用いた供試体の条件 (初期相対密度など) にはくらかのばらつきもあるため、圧密後の供試体の条件も同一になるようにし、特にせん断の初期の部分について詳細に検討することとした。新たに行った試験 (圧密後の p' は 98 kPa についてのみ) について、異方圧密後の供試体条件の一覧を表 5-05 に示すが、3種類の試験における供試体の間隙比や圧密後の応力状態に有意な差はない。

表 5-05 異方圧密後の供試体条件の一覧

圧密径路 (一定)	相対密度 D _r (%)	間隙比	σ_1' (kPa)	σ_2' (kPa)	σ_3' (kPa)
K 一定	63.9	0.7405	158.3	68.3	63.2
σ_3' 一定	64.3	0.7389	161.1	69.0	64.4
p' 一定	64.3	0.7388	161.7	68.0	64.7

図 5-24, 5-25 には、上述した軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$) ・ 中間主応力 ($\sigma_2' - \sigma_3'$) および体積ひずみと軸ひずみの関係を、せん断の初期の部分について詳細に示した。これらの図で、「○, △, ×」の印はそれぞれ上述の分類と同じである。これらの図より、供試体の剛性は、p' 一定 → σ_3' 一定 → K一定の径路になるにしたがって大きくなっており、また、体積ひずみに関しても圧縮性（体積ひずみ－軸ひずみの傾き）・圧縮量ともにこの順番で大きくなっているのがわかる。

これらの特性を表 5-06 に数値で示したが、K一定の径路で圧密したもの（ほぼK₀圧密になっている）は供試体の剛性が一番大きい、さらに、体積ひずみの圧縮性・圧縮量も一番大きくなっており、また、中間主応力の発達も最も顕著である。

表 5-06 軸ひずみ・体積ひずみの比較

圧 密 径 路		K ₀	σ_3' 一定	p' 一定
せん断剛性	$d \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3'} / d \epsilon_1$	1.584	1.508	1.435
中間主応力	$d \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_3'} / d \epsilon_1$	0.530	0.380	0.260
体積ひずみ	$d \epsilon_v / d \epsilon_1$	0.280	0.198	0.162
	$\epsilon_{v-max} \quad (%)$	0.85	0.75	0.64

剛性が大きく、中間主応力の発達も大きいにもかかわらず、圧縮性も大きいというのは一見矛盾するように思われるが、これには側方変形（膨張）を考慮して考察する必要がある。すなわち、K一定の径路で圧密したもの（K₀圧密したもの）は圧密段階でのダイレイタンスの発達が最も少なく、せん断を開始すると中間主応力は発達するものの、すぐ

には側方への膨張が始まらない。その一方で、 σ_3' 一定・p' 一定の径路で圧密したものは圧密中すでにダイレイタンスによる（側方への）体積膨張の発達が始まっており、せん断を開始した直後でも軸方向への圧縮とともに側方への体積膨張も同時に生じていると考えられる。以上のことより、圧密径路の違いによって供試体の土粒子構造はいくぶん異なり、その影響はせん断初期のダイレイタンス特性の違いとして、供試体の初期剛性や初期圧縮性にいくらかの違いを生じさせることがわかった。これらの違いは、例えば非排水繰返し載荷など、低応力域での砂の力学特性に重要な影響を及ぼす可能性もあるため、第7章で述べる土の非排水繰返し平面ひずみ挙動の結果の検討においても再考する。

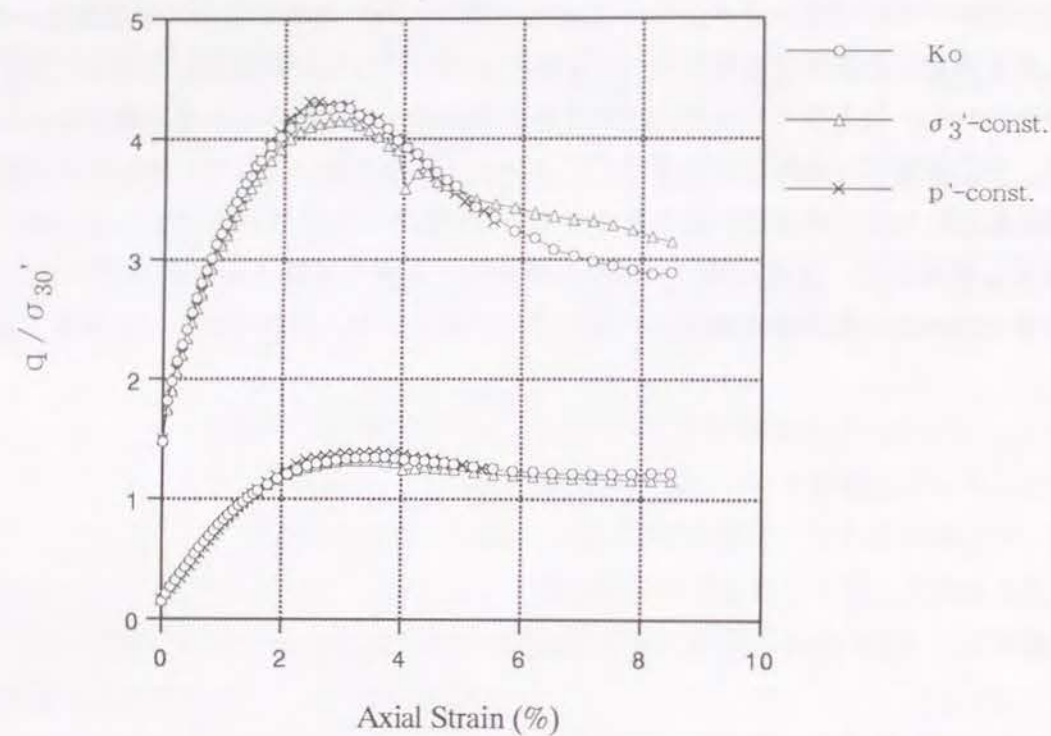


図 5-22 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

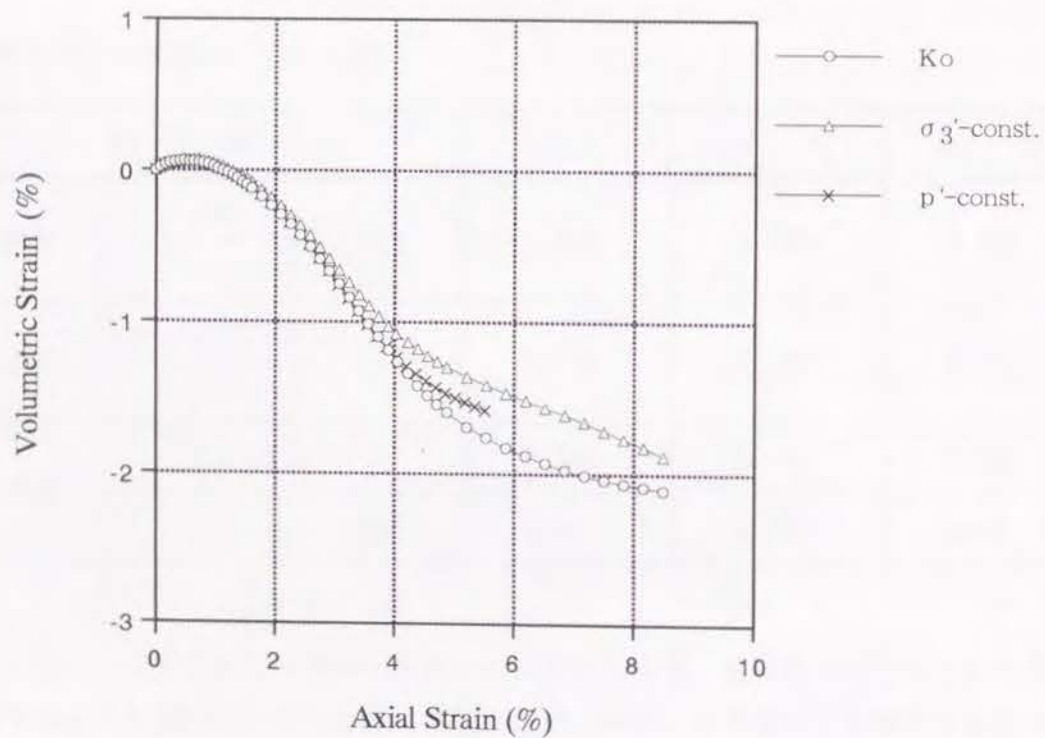


図 5-23 体積ひずみ-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Volumetric Strain Relationships)

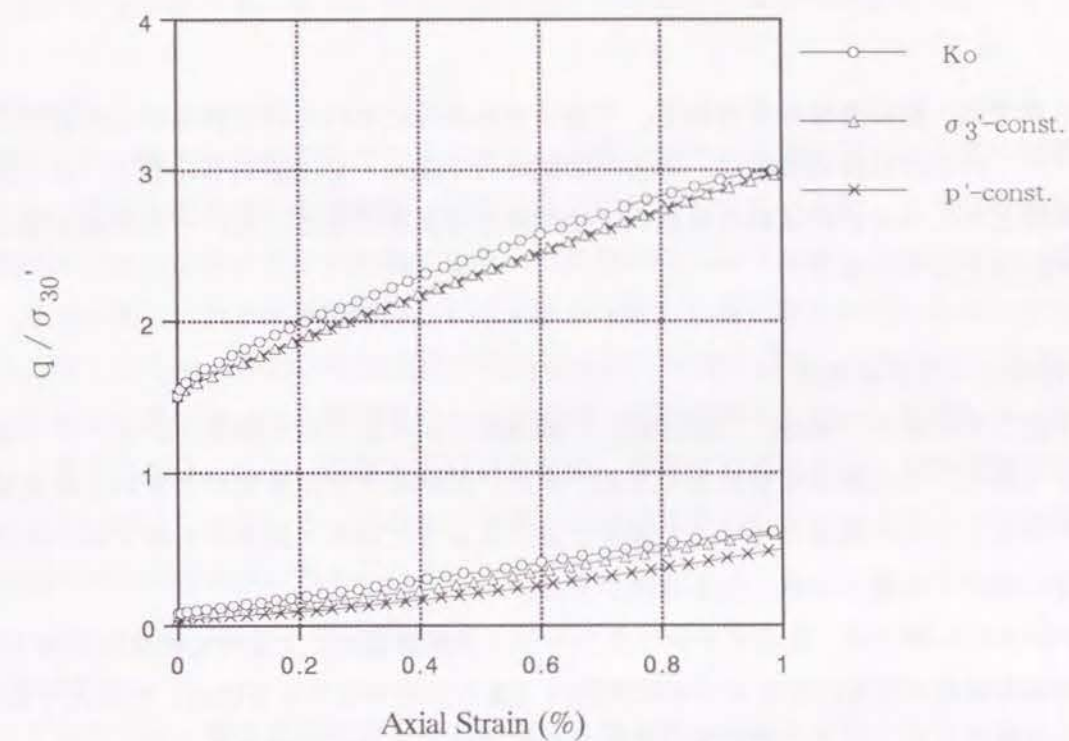


図 5-24 応力-ひずみ関係 (せん断初期部分)
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships at the Beginning of Shear)

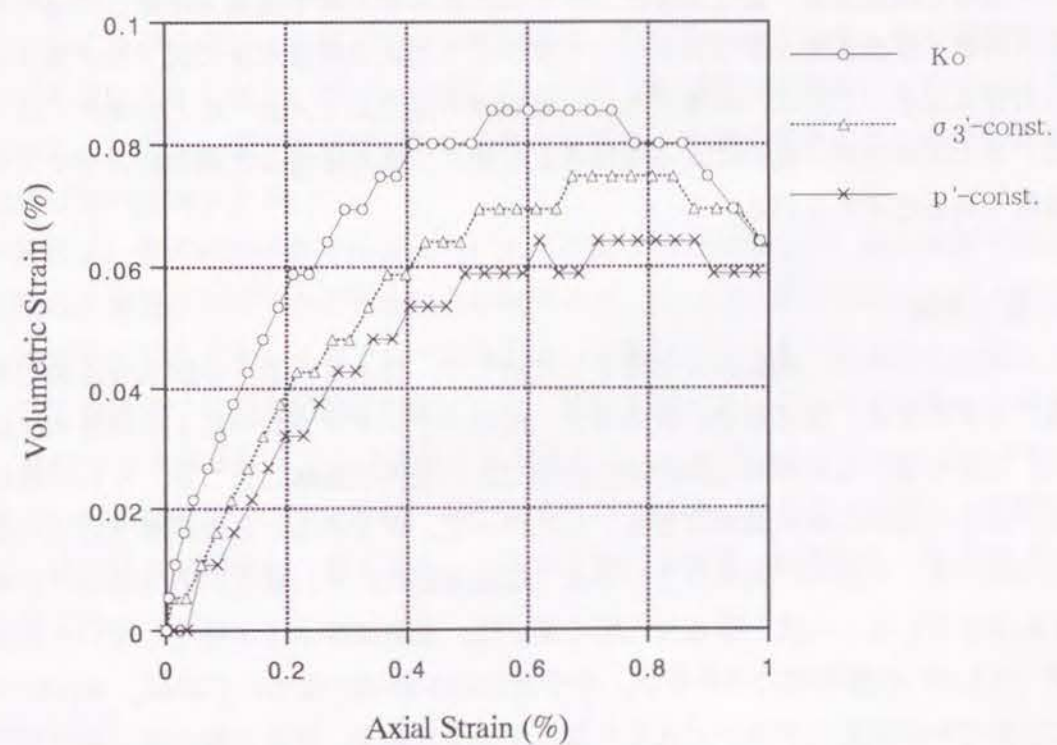


図 5-25 体積ひずみ-軸ひずみ関係 (せん断初期部分)
(Axial Strain v. s. Volumetric Strain Relationships at the Beginning of Shear)

5.5 まとめ

本章では、飽和豊浦砂を用いて、平面ひずみ条件における砂の静的せん断特性について調べた。行った試験の種類は、等方圧密試料の非排水・排水静的せん断と、 K_0 圧密状態を基準とする異方圧密試料の非排水・排水静的せん断である。これらの試験を通して得られた結論を以下に示す。

(1) 応力-ひずみ関係

平面ひずみ条件の場合、(軸対称)三軸条件に比べるとせん断応力のピークの現れ方が顕著であり、せん断強度も大きくなる。また、供試体の相対密度が大きいと最大強度が大きくなるとともに強度のピークも顕著に表れるようになり、排水せん断ではピーク強度時までの軸ひずみ量も小さくなる傾向がある。

非排水せん断では、負のダイレイタンス(体積膨張)による有効拘束圧の増大のため、軸差応力は最大強度に至るまでほぼ直線的(異方圧密ではやや下に凸)に増大する。また、この影響によりピークの現れ方は排水せん断に比べると顕著である。

圧密履歴の影響については、異方圧密した場合、せん断開始直後の軸差応力・中間主応力の立ち上がりが急になり、ピーク強度に至るまでの軸ひずみ量も小さくなる点が等方圧密した場合とは異なる。最大強度については、排水せん断では異方圧密した場合の方がやや大きい。非排水せん断ではダイレイタンスによる間隙水圧の低下量が異なるためかなり大きくなる。しかし、両者ともに、破壊時の応力比 q/p' などの強度パラメータで比較すると圧密履歴の違いによる差はあまり無く、異方圧密した場合の方がやや大きくなる程度であると考えられる。

(2) 応力径路

応力径路の形状は、拘束圧の大きさに比例して、排水せん断・非排水せん断でそれぞれ同様の形状になる。非排水せん断の場合、負のダイレイタンスによる間隙水圧の影響がかなり大きく現れるためせん断初期の段階で急に限界状態線に近づき、それ以降は限界状態線に漸近しながら最大強度に至る。したがって、砂であるため圧密降伏応力がかなり大きいとはいえ、一般的に知られているような過圧密比の高い粘土の応力径路の形状とも大きく異なっている。一方、排水せん断の場合は、過剰間隙水圧が発生しないためほぼ傾き一定(≈ 3.0)の直線状ではあるが、やや上に凸の形状となる。これは、せん断が進行するにつれて中間主応力が徐々に大きくなっていくため、通常の軸対称三軸状態に比べると平均有効主応力の増分が中間主応力の分だけ大きくなり、応力径路の傾きが3.0より

小さくなるためである。なお、限界状態線の傾きは圧密条件や排水条件によらずほぼ一定の1.4~1.5程度であるが、異方圧密した場合にはやや大きくなる傾向がある。

(3) 間隙水圧

砂の場合、せん断力による砂粒子の負のダイレイタンス(体積膨張)が大きく影響しているため、間隙水圧はせん断開始後しばらくは正の値をとっているが、すぐに負の値に転じ、最終的にはかなり大きな負の値になる。この傾向は、異方圧密した場合さらに顕著であり、異方圧密により土粒子の噛み合わせが等方圧密した場合よりも密になることを示していると考えられる。また、間隙水圧が最終的には一定値に収束しているが、これは、試料がいわゆる限界状態(せん断が進行しても体積ひずみに変化しない)に達しているためであると考えられる。なお、間隙水圧の収束値は、拘束圧が同じ場合、相対密度が大きいものほど低い値になっている。これは、密度が大きいものほどダイレイタンスの影響が顕著に現れるためであると考えられる。

(4) 体積ひずみ

体積ひずみについても上述の間隙水圧と同様に、せん断力による砂粒子の負のダイレイタンス(体積膨張)の影響が大きく現れる。つまり、せん断開始後一旦は圧縮されるが、その後供試体は体積を膨張させながら最大強度に至る。強度のピークを越えた後も供試体は体積膨張を続けるが、残留強度に至っても供試体の体積膨張はしばらく続き、軸差応力に比べて収束するのは遅い。体積ひずみの収束値は、拘束圧が同じ場合、相対密度が大きいものほど負側に大きくなり、ダイレイタンスによる体積膨張が顕著に生じていることを表している。ただし、相対密度が70%を超える場合、体積膨張量は相対密度の影響をそれほど受けない傾向もある。

以上の特性は、等方圧密・異方圧密ともにあてはまるものであるが、異方圧密では特にせん断初期の圧縮量が非常に小さいという特徴がある。これは、異方圧密により土粒子の噛み合わせが密になりダイレイタンス特性がさらに異なってくるためと考えられ、上述の応力-ひずみ関係で初期接線勾配が急になり、拘束圧が大きいものほど初期の圧縮量が小さく、最終的な体積膨張量が大きな値で収束することにも関係していると考えられる。なお、異方圧密径路の違いについては、 K 一定の径路で圧密したもの(ほぼ K_0 圧密になっている)は供試体の剛性が一番大きく、体積ひずみの圧縮性・圧縮量も一番大きくなることがわかった。

(5) 中間主応力

中間主応力については、ピークの位置が軸差応力のそれと一致しており、その増減の様子も軸差応力にほぼ比例している。これを中間主応力係数について見ると、せん断開始後

すみやかに 0.2~0.3 になり、その後はほぼ一定またはわずかに増加しながら破壊に至っている。また、破壊時の中間主応力係数については、拘束圧や供試体の初期密度によらず 0.25~0.30 であり、圧密条件やせん断中の排水条件などによって多少は異なるもののほとんど同じ値となっている。また、中間主応力係数がほぼ一定値に落ち着くまでの状態について見ると、排水せん断では供試体が一旦圧縮されて体積膨張が始まった辺りであり、非排水せん断では間隙水圧が一旦上昇して減少に転じる辺りであることがわかる。等方圧密と異方圧密ではせん断開始直後の中間主応力係数の変動の仕方が多少異なるものの、一定値に落ち着く前後の挙動はほとんど同じである。

これらの様子を、 π 平面（正八面体応力面：Octahedral Stress Plane）での応力経路として示したものが図 5-26、5-27 である。これらの図より、排水条件によって経路の形状や限界状態での収束値にいくらかの差はあるものの、圧密履歴の違いによる影響などはほとんど認められない。このように、本研究では、砂の静的せん断を行った場合、排水条件の違いによって中間主応力の発達は多少異なるものの、破壊時（限界状態時）の中間主応力係数の値は試験条件によらずほとんど同じ値になることが明らかになった。中間主応力の存在は、平面ひずみ条件と軸対称三軸条件との大きな違いの一つであり、平面ひずみ条件にある土の挙動を解明する際には注目すべき要因の一つであるため、次章で述べる粘土の試験結果などとともに章を改めて総合的に考察することにする。

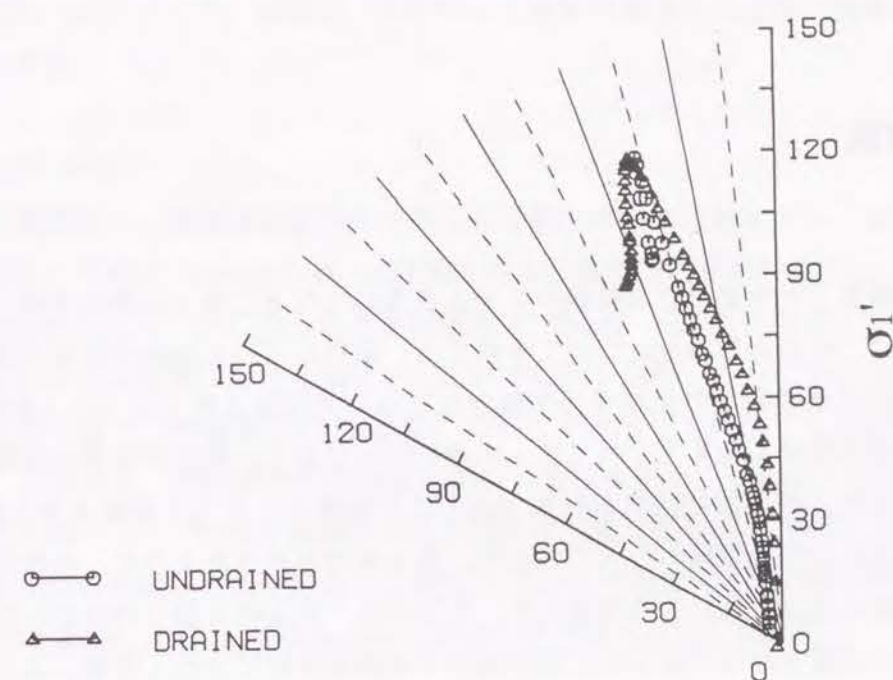


図 5-26 π 平面応力経路
(Stress Path on Octahedral Plane)

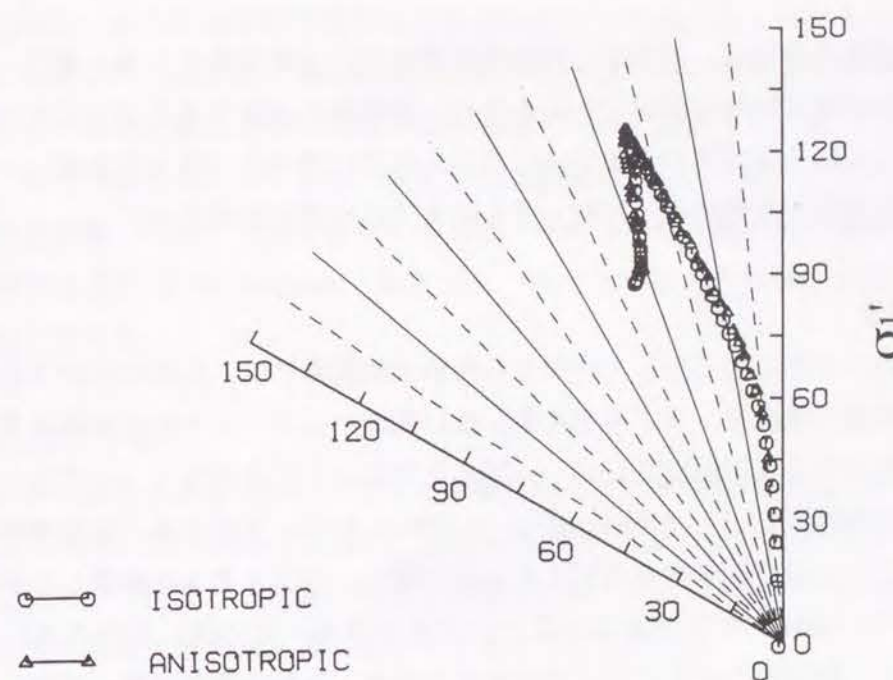


図 5-27 π 平面応力経路
(Stress Path on Octahedral Plane)

第6章 粘土の静的平面ひずみ挙動

6.1 概説

ここでは、構築した平面ひずみ試験システムを用いて行った粘土の静的平面ひずみ試験の結果をもとに、その力学特性について考察する。試験に用いた試料は市販のカオリン粘土であり、試料の物理特性や供試体の作製方法については第4章で述べたとおりである。圧密は平面ひずみ条件を考慮してすべてK_o圧密を行っており、過圧密履歴の影響についても検討した。また、せん断は試料が粘土であることを考慮してすべて非排水せん断とした。なお、比較のために三軸試験も行っているが、第4章でも述べたように、供試体形状の違いが結果に影響を及ぼさないよう考慮した。すなわち、拘束枠を取り付けない点を除けば供試体の形状や試験方法など基本的には平面ひずみ試験と同じ方法・手順によって試験を行った。

6.2 試験方法

静的せん断試験の方法は、基本的には地盤工学会の「土質試験の方法と解説」に従ったが、平面ひずみ試験は特殊な試験でもあるため、基準外の方法や独自の方法を用いた部分もある。用いた試料や供試体の作製方法については既に述べた（第4章参照）ので、ここでは、供試体の設置から飽和化・圧密・せん断までの手順を説明する。

(1) 供試体の設置

予備圧密ブロックから切り出し・作製された粘土供試体には、圧密時の排水促進のために上下面には普通の濾紙を、ひずみを拘束しない側面にはスリット状の濾紙をそれぞれつける。また、供試体の上下面はゴムスリーブとテフロンシートをシリコングリースで貼り合わせた端面摩擦軽減シート（Tatsuoka *et al.* (1984) 参照）ではさみ、端面摩擦の軽減にも注意した。この状態で供試体をペDESTAL上に載せ、ペDESTALを調節しながら供試体頭部をキャップに接触させてからゴムスリーブをかける。その後、初期拘束圧 19.6kPa を負圧で載荷し、軸差応力が常にゼロであるよう注意しながら等方圧縮（圧密）する。約 1時間放置し、供試体の変形がおさまったのを確認した後、ひずみ拘束のための拘束枠を取り付ける。この時、ひずみ拘束板にはテフロンシートを貼り付け、ゴムスリーブとの接

触面にはシリコングリースを塗って端面摩擦の軽減に注意した。なお、拘束枠を取り付ける時の力は約 1kPa とした。最後に、負圧による初期拘束圧をセル圧に置換し、供試体の設置は完了する。

(2) 圧密までの手順

供試体の設置後は、供試体およびその周辺を飽和させる過程に入る。飽和化は、砂の供試体の場合と同様に Ampadu *et al.* (1989) の二重負圧法と呼ばれる方法により行った。これは、有効拘束圧を一定に保ったまま間隙圧を -98kPa 程度まで下げて不溶空気を除去した後、この負圧を解除しながら脱気水を間隙中に流し込み、さらに供試体の体積分以上の脱気水を微小差圧（水頭差で15cm程度）のもとで通水して残留する気泡を除去するのである。この結果、供試体やその周辺はかなり飽和するが、この後さらに背圧 198kPa を載荷して一晩（6～7時間）放置することにより、完全飽和をめざした。飽和状態の確認についても砂の供試体と同様にセル圧を減少させる方法（第2回三軸圧縮試験実技講習会報告 (1983) 参照）で行い、Skempton の間隙水圧係数 B 値 ≥ 0.96 をもって完全飽和とみなした。

(3) 圧密の手順

圧密は、平面ひずみ条件を考慮し、基本的には異方圧密（K_o圧密）を行った。異方圧密の手順も砂の供試体の場合と同じで、初期の基準状態（ $\sigma'_v = 19.6$ kPa；等方）から平均有効主応力一定の排水径路で目的とする応力比にした後、K_o条件を保ちながら軸圧とセル圧を調整した。圧密終了時の体積ひずみや側方ひずみの変動値の基準もすべて砂の場合と同じであるが、軸圧の増加速度は砂の場合の 1/10 程度とし、約 0.03kPa/min である。また、粘土の供試体については、過圧密比の影響についても調べるため、K_o状態を保持したまま膨潤（除荷）させる過程も加えた。その方法は、軸圧を一定速度で除荷する点（軸圧除荷速度約 0.03 kPa/min）を除けば、側方ひずみの許容値や圧密の終了条件などは全く同じである。

(4) 静的せん断の手順

静的せん断は非排水条件で行い、ひずみ制御で行った。せん断時の軸ひずみ速度は、約 0.01%/min であり、砂の場合と同様に、せん断速度は D/A の出力時間間隔で決定される。また、サンプリングに関しても砂の場合と同様で、特にせん断初期はその間隔を細かくとり、軸差応力の急激な増大も正確に測定できるようにしている。

6.3 粘土の静的せん断挙動

ここでは、平面ひずみ条件における粘土の基本的な静的せん断特性を調べることを目的としている。粘土は一般に透水係数が小さく、短期的には非排水条件にあると考えられるため、試験条件も非排水せん断のみに限った。また、平面ひずみ条件では、その応力・変形条件を考えると、供試体は異方圧密（ K_o 圧密）するのが本来的であると考えられる。従って、圧密条件としては、すべて K_o 圧密とした。

6.3.1 異方（ K_o ）圧密

ここで行った異方圧密は、上述のように、平面ひずみ条件を考えてすべて K_o 圧密である。また、過圧密比の影響についても考慮するため、 K_o 状態を保持したまま膨潤（除荷）する過程も加えた。図 6-01 に K_o 圧密の応力経路の概念図を示したが、詳細については上述のとおりである。なお、用いた供試体についてはすべて同じ予備圧密ブロックから切り出して整形したものであり、供試体の違いによる差はほとんどないと考えられる。また、ここでは、比較のため、供試体の形状は全く同じで拘束枠を取り付けないだけの三軸状態の異方圧密も併せて行っている。

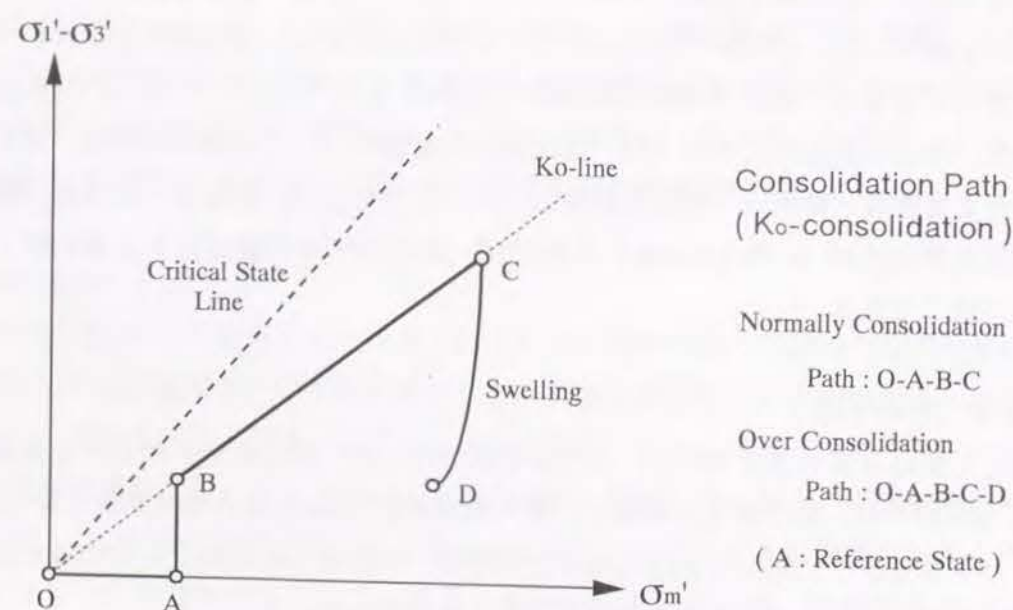


図 6-01 圧密経路の概念図
(Images of Stress Path for Consolidation)

(1) 応力-ひずみ関係

図 6-02 に、本研究で行った K_o 圧密の代表的な応力-ひずみ関係を示した。この図より、初期の p' 一定で排水圧縮している部分を除く、いわゆる K_o 圧密段階では、応力-ひずみ関係が下に凸の曲線となっているのがわかる。これは、圧密中に側方ひずみを生じさせないように軸圧の増加とともにセル圧を調整（増加）させているため、圧密が進むにつれて供試体の剛性が高まっていくことによるものである。また、 K_o 圧密初期段階に現れている応力-ひずみ曲線の曲率点は、その応力レベルから予備圧密による過圧密領域との境界点にあたる。すなわち、初期の勾配が急な部分が過圧密領域であり、それ以降の部分が正規圧密領域である。なお、図中には中間主応力の挙動も示してあるが、拘束枠取り付け時の荷重値のまま K_o 圧密過程全体にわたってほぼ一定に保たれていることから、側方ひずみがほとんど生じていないことが確認できる。また、図には三軸条件（拘束枠を取り付けない状態）での K_o 圧密の結果も併せて示してあるが、中間主応力がない点を除けば平面ひずみ条件の曲線と一致しており、拘束枠の有無にかかわらず同じ条件で K_o 圧密がなされていることが確認できる。

(2) 応力経路

図 6-03 には、本研究で行った K_o 圧密の応力経路（これらは上述の図 6-02 に示したものを同一の供試体である）を示した。ここで行っている K_o 圧密は、側方ひずみが生じないという条件だけで制御しており、特に圧密中の応力状態を制御している訳ではないが初期の平均有効主応力一定の経路の後にはほぼ応力比一定の直線になっているのがわかる。これは、今回考慮の対象とした通常の圧密圧力レベルでは、 K_o 値がほとんど変化しないことを表すものと考えられる。実際、これらの試験中の K 値（ $=\sigma'_1/\sigma'_3$ ）を求めてみる（図 6-04 参照）と、 $K=0.55\sim 0.60$ のほぼ一定値になっているのがわかる。

(3) 側方ひずみ

図 6-05 には K_o 圧密中の側方ひずみ-軸ひずみの関係を示した。この図より、初期の p' 一定排水圧縮過程を除くと、側方ひずみの変動範囲はほぼ $\pm 0.01\%$ 以内に収まっているのがわかる。本実験では、システムの精度限界値である側方ひずみ $\pm 0.005\%$ を調整基準として K_o 圧密の制御を行っているが、この $\pm 0.01\%$ の変動幅は K_o 圧密の条件としては満足できるものであり、本実験における K_o 圧密の制御は良好であったと考えられる。

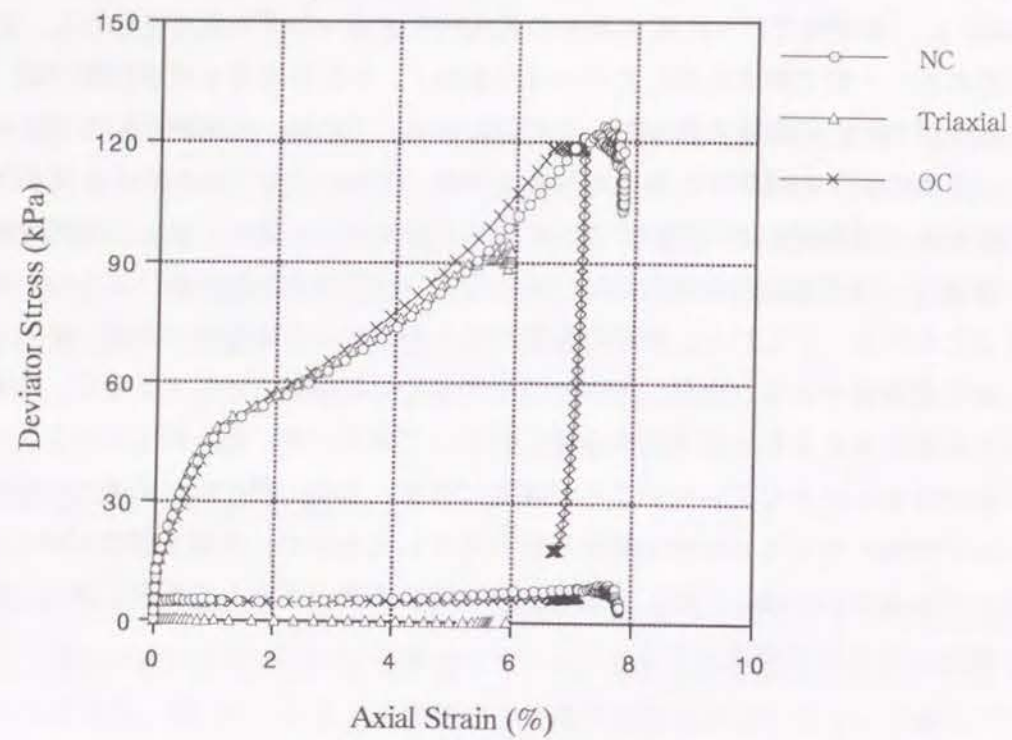


図 6-02 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

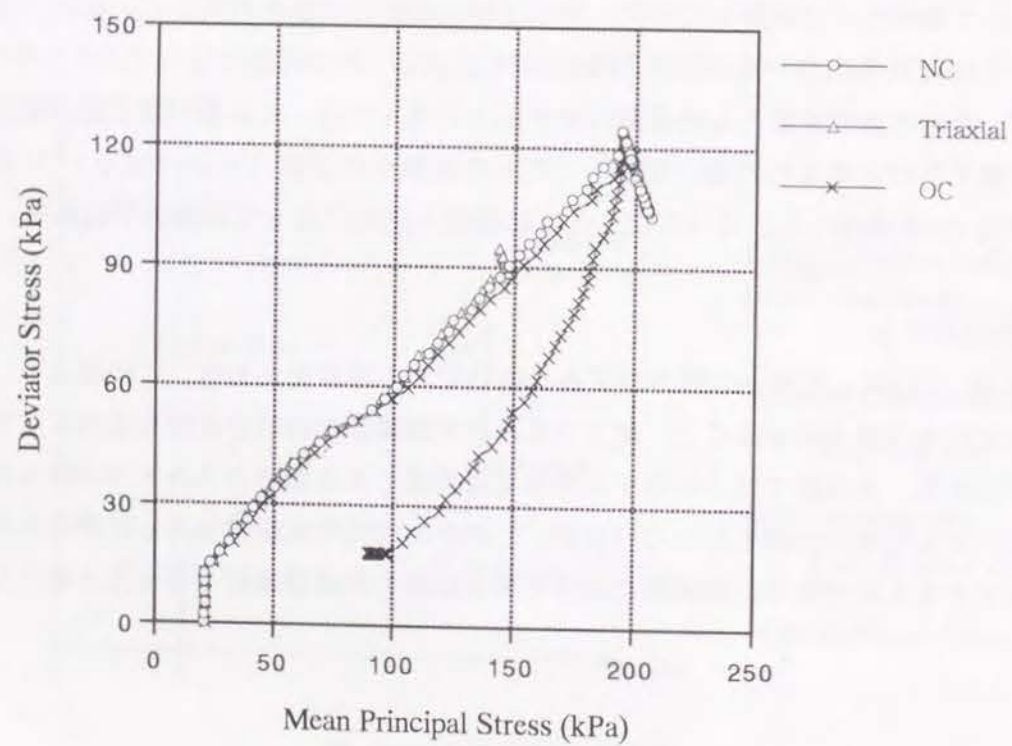


図 6-03 応力径路
(Stress Path)

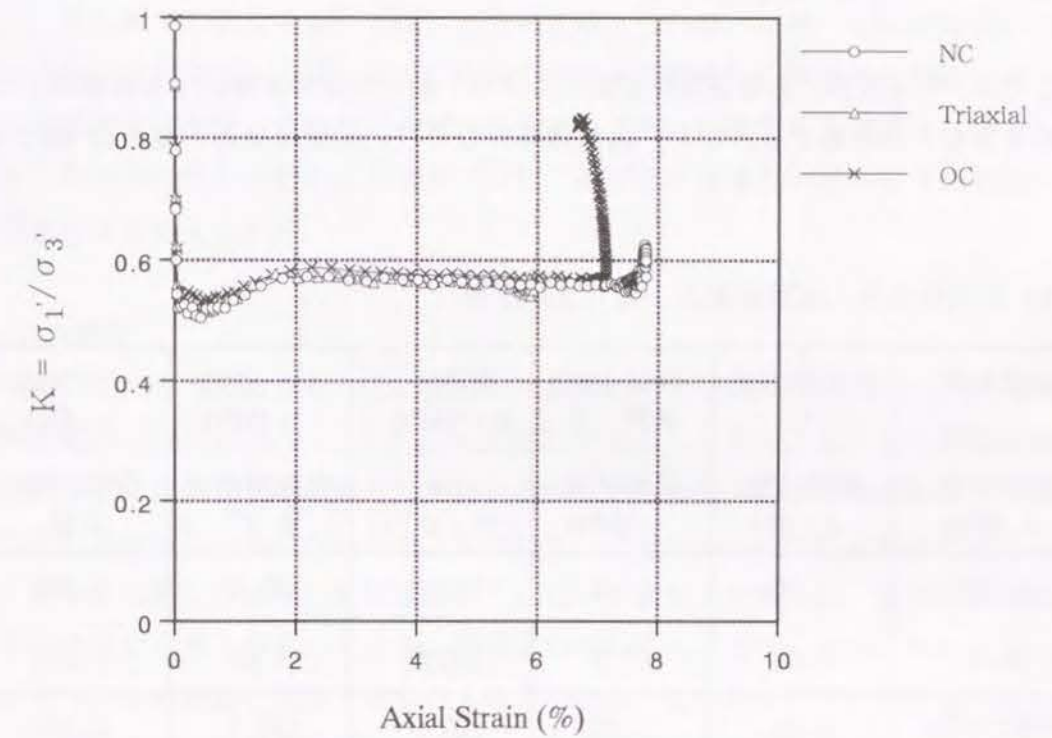


図 6-04 K値-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. K-value Relationships)

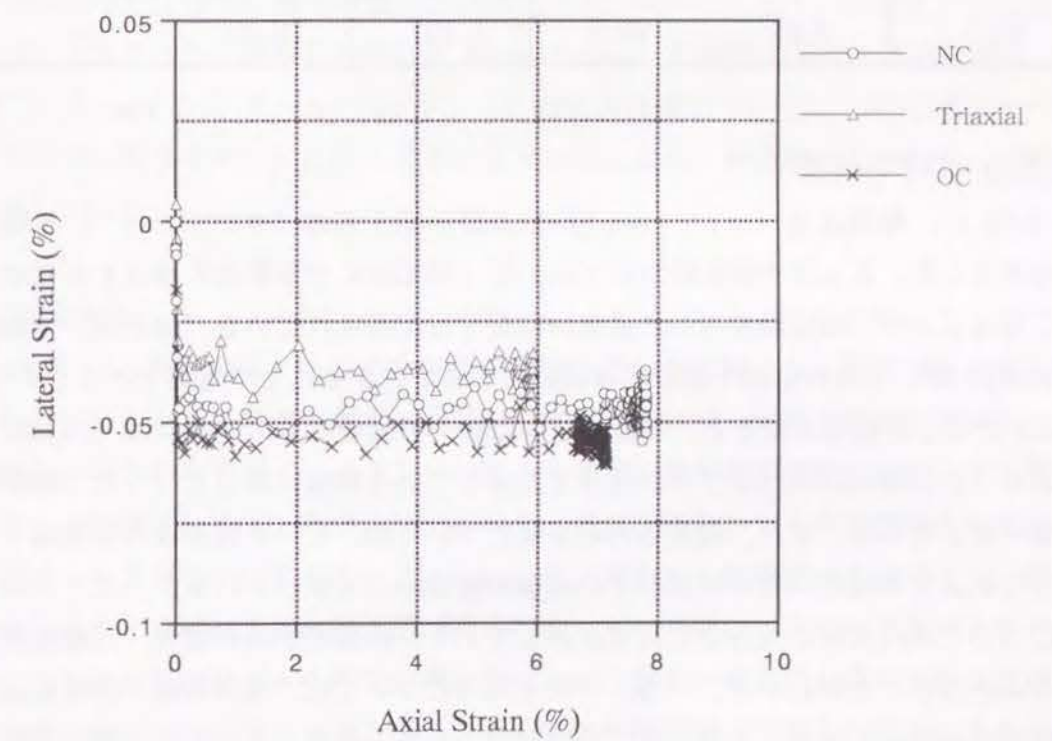


図 6-05 側方ひずみ-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Lateral Strain Relationships)

6.3.2 Ko 正規圧密非排水せん断

ここでは、Ko状態にある正規圧密飽和力オリソ粘土の非排水静的せん断挙動について、試験結果をもとに考察する。なお、供試体条件ならびに試験結果の一覧を表 6-01 に示した。

表 6-01 供試体条件・試験結果の一覧（正規圧密）

試験条件	初期間隙比 e_0	間隙水圧 係数: B	拘束圧 p_0' (kPa)	ピーク時 q (kPa)	ピーク時 ε_1 (%)
限界状態 q (kPa)	限界状態 ε_1 (%)	限界状態 u (kPa)	M (q/p')	内部摩擦角 ϕ' (°)	限界状態 b 値
平面ひずみ	1.30	0.99	148.6	103.0	0.378
94.4	3.08	67.3	1.030	29.04	0.324
平面ひずみ	1.29	1.02	202.0	139.7	0.277
128.4	3.49	95.4	1.027	29.06	0.335
三 軸	1.21	0.98	144.8	102.0	0.050
90.5	7.22	63.2	1.137	28.52	-----

(1) 応力-ひずみ関係

図 6-06 に、軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$) および中間主応力 ($\sigma_2' - \sigma_3'$) と軸ひずみの関係を示した。Ko 圧密粘土については、ピーク強度に至るまでの軸ひずみ量が非常に小さくなるのが三軸試験を用いた従来の研究でも指摘されている（例えば、Ampadu *et al.* (1988)）が、この特徴は平面ひずみ試験にもあてはまることが確認できる。すなわち、図 6-06 に示した結果を見ると、平面ひずみ試験での軸差応力のピークは 0.5% 以下で生じており、この傾向は同じグラフに併せて表示している拘束棒無しで行った三軸試験の結果とも一致している。また、軸差応力の挙動については、ピーク強度後の強度低下が三軸試験のそれよりも大きい点が平面ひずみ試験の特徴として挙げられるが、ピーク強度の大きさについては拘束圧の大きさにほぼ比例しており、拘束圧が同じ場合、三軸強度との差はほとんどないことがわかる。一方、中間主応力については、増減の様子が軸差応力のそれとは全く異なっている。すなわち、中間主応力が最大値をとるのは軸差応力が最大になった時よりもかなり後であり、また、最大値になった後も低下せずにはほぼ一定の値をとっ

ているのがわかる。これは、正規圧密粘土では、ダイレイタンスの発現が砂ほど顕著ではなく、せん断中の塑性変形が卓越するためと考えられる。なお、この中間主応力が最大値になる時の状態については、後述する応力経路や間隙水圧の挙動から判断して、ちょうど限界状態付近に相当していることがわかった。また、中間主応力が最大になった直後ぐらいから供試体にせん断面が現れ始めており、供試体の破壊と中間主応力の挙動には密接な関係があると考えられる。

(2) 応力経路

図 6-07 に、応力経路を示した。ただし、縦軸は軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$)、横軸は平均有効主応力 ($(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') / 3$) である。この図より、応力経路の形状は拘束圧の大きさに比例した相似形をしてはいるが、通常の等方圧密三軸試験などとはその形状がかなり異なっているのがわかる。すなわち、上述の応力-ひずみ関係にも見られたように、Ko 圧密粘土ではせん断開始後すぐにピーク強度に至るため、応力経路はせん断初期の部分で急に立ち上がり、その後、軸差応力がわずかに低下しながら平均有効主応力の減少とともに限界状態に到達するものと考えられる。したがって、この結果からもわかるように、粘土の Ko 正規圧密試料では通常の等方正規圧密試料のように「最大強度=限界状態」とならない点に注意する必要がある。また、正規圧密粘土の場合、次項で示す発生する間隙水圧の大きさはピーク強度と限界状態との平均有効主応力の差の値にほぼ等しいことがわかった。なお、限界状態における応力比 ($M = q/p'$) の値はこの試験の場合約 1.05 であり、この値から計算した Mohr-Coulomb の規準における内部摩擦角 ($\phi' \approx 26.5^\circ$) は Jaky の式 $K = 1 - \sin \phi'$ (この式の誘導については、例えば落合 (1985) の文献などがわかりやすい) に代入すると $K \approx 0.55$ となり、本実験で行った Ko 圧密での値に一致している。

(3) 間隙水圧

図 6-08 に、間隙水圧-軸ひずみの関係を示した。この図より、間隙水圧はせん断開始後、軸差応力とともに急激に増大し、限界状態付近ではほぼ一定値に収束している。砂では圧密条件にかかわらずダイレイタンスによる体積膨張の影響で間隙水圧はせん断開始後間もなく負の値に転じていたが、粘土の場合、異方圧密をしても体積膨張を引き起こすほどのダイレイタンスは生じないことがわかる。また、三軸条件と比較すると、発生する間隙水圧の大きさは試験時の拘束圧が同じであっても平面ひずみ条件の方が大きくなっている。これは、平面ひずみ条件では拘束棒によって側方への変形が抑制されるため、三軸条件の場合のようなダイレイタンスによる間隙水圧抑制の効果も抑制されるためと考えられる。なお、同じ平面ひずみ条件で比較した場合、発生する間隙水圧の大きさは拘束圧の大きさにほぼ比例しているのがわかる。

(4) 中間主応力係数

図 6-09 に、中間主応力係数 (b 値 $= (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$) と軸ひずみの関係を示した。この図より、中間主応力係数の値は拘束圧の大きさによらず、せん断開始後 0.3 程度まで急増し、それ以降はゆっくりと増加しながら b 値 $= 0.5$ 付近の値に収束する傾向を示しているのがわかる。上述の応力-ひずみ関係や応力径路とあわせて考えると、 b 値の急増が終わる変曲点の辺り (b 値 ≈ 0.3 の辺り) がちょうど限界状態に相当しているのがわかる。すなわち、異方圧密された正規圧密粘土においても限界状態での b 値は約 0.30 であり、砂の場合ともほぼ一致している。応力-ひずみ関係のところでも説明したように、供試体の破壊と中間主応力の挙動には密接な関係があると考えられるが、限界状態における b 値が砂・粘土を問わずほぼ同じ値になるという実験事実は、平面ひずみ条件における土の挙動を解明する際、注目すべき点である。

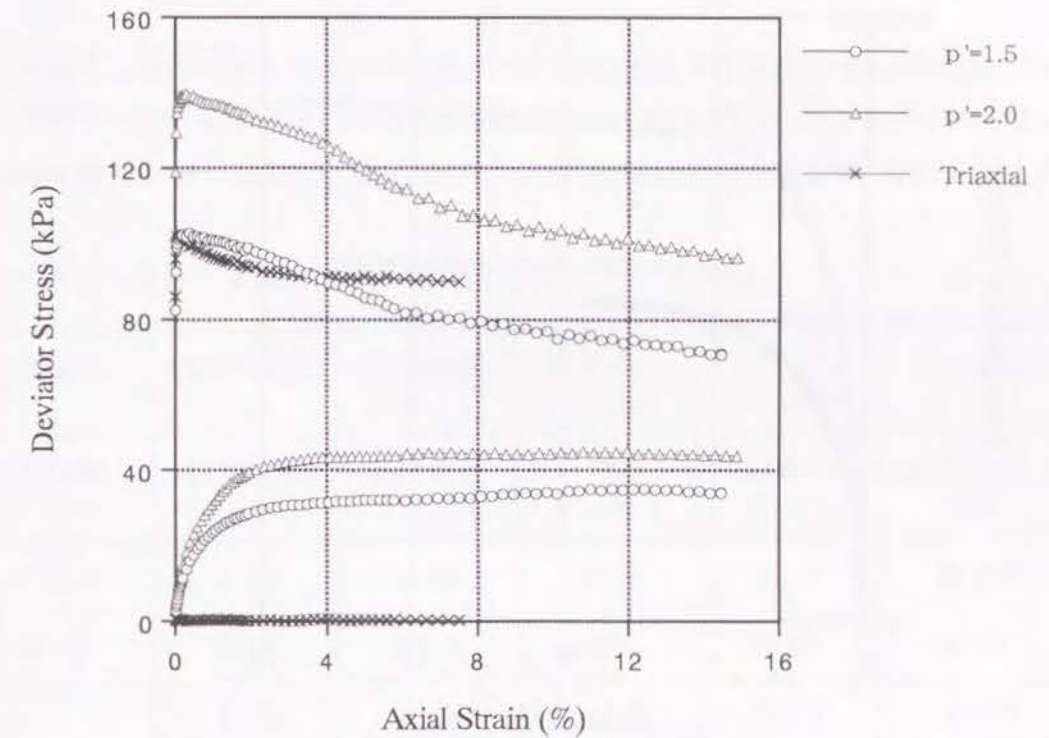


図 6-06 応力-ひずみ関係

(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

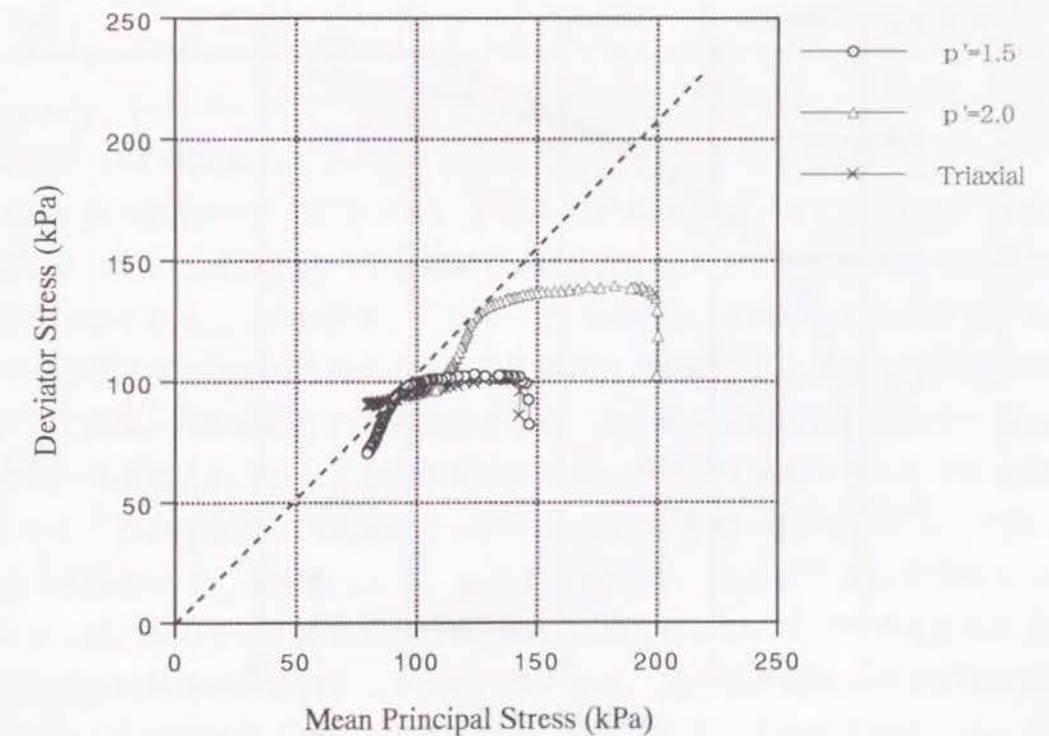


図 6-07 応力径路

(Stress Path)

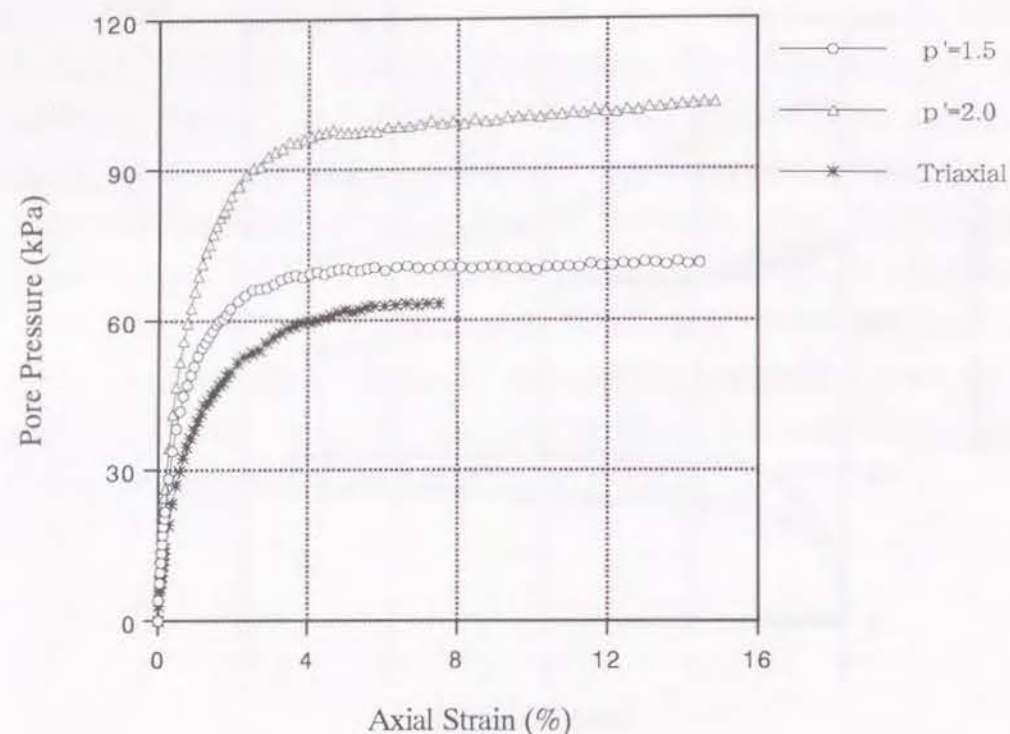


図 6-08 間隙水圧-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Pore Pressure Relationships)

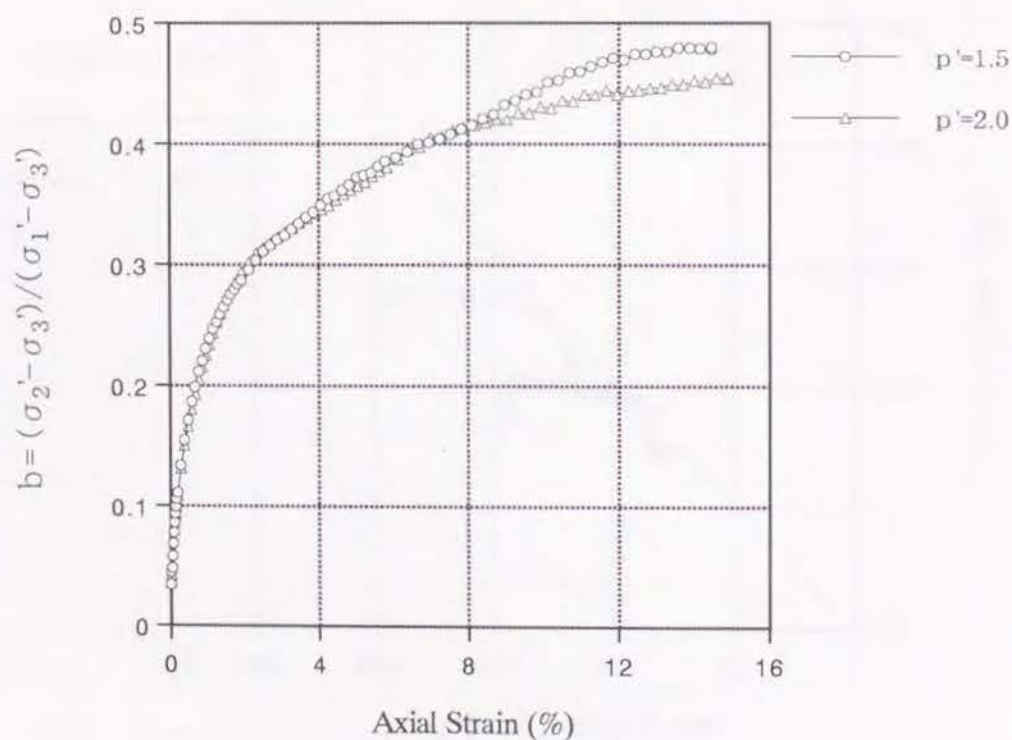


図 6-09 中間主応力係数-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. b-value Relationships)

6.3.3 K_o 過圧密非排水せん断

前節ではK_o状態にある正規圧密飽和カオリン粘土の非排水静的せん断挙動について調べたが、ここでは、K_o状態にある過圧密粘土についても同様の検討を行い、それらの特性を比較・検討する。なお、供試体条件ならびに試験結果の一覧を表 6-02 に示した。

表 6-02 供試体条件・試験結果の一覧 (過圧密)

過圧密比	初期間隙比 e_0	間隙水圧 係数: B	拘束圧 p_0' (kPa)	ピーク時 q (kPa)	ピーク時 ε_1 (%)
限界状態 q (kPa)	限界状態 ε_1 (%)	限界状態 u (kPa)	M (q / p') _f	内部摩擦角 ϕ' (°)	限界状態 b 値
1.0	1.30	0.99	148.6	103.0	0.378
94.4	3.08	67.3	1.030	29.04	0.324
1.8	1.15	0.99	144.6	131.5	0.847
127.0	3.91	66.4	1.037	29.33	0.331
2.8	1.19	0.98	132.0	163.7	2.320
163.1	3.31	38.3	1.044	29.62	0.339

(1) 応力-ひずみ関係

図 6-10 に、軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$) および中間主応力 ($\sigma_2' - \sigma_3'$) と軸ひずみの関係を示した。この図より、K_o状態では過圧密粘土でもピーク強度までの軸ひずみ量がかなり小さくなることがわかる。しかし、正規圧密粘土ではピーク強度までの軸ひずみが 0.5%以下であったことを考えると、過圧密粘土では軸ひずみ量が 1~2%前後とやや大きい。これは、試料が過圧密状態にあるため、せん断の初期段階には膨潤によって生じた膨張分が再圧縮されることになるので、いくぶん弾性的な挙動を示したものと考えられる。しかし、この弾性成分 (膨潤によって生じた軸ひずみ量: 膨潤条件によって異なるが、ほぼ 0.5%程度以下) を考慮しても、軸ひずみ量が 1~2%というのはまだ大きい。この原因としては、せん断開始時の応力状態の違いもかなり影響していると考えられる。つまり、膨潤後の供試体は等方的な応力状態になるため、異方圧密特有の性質が膨潤過程でかなり失われるためであると考えられる。なお、過圧密比が同じ試料の場合、ピーク強度などの大きさは正規圧密の場合のように拘束圧の大きさにほぼ比例し、応力-ひずみ曲線も

相似形になっていることがわかる。しかし、過圧密比が異なると応力-ひずみ曲線の形状も異なり、ピーク強度を過ぎてから限界状態に至るまでの軸差応力の変化も過圧密比が大きくなるほどその低下量は小さくなる傾向がある。また、中間主応力については、その最大値は限界状態で生じ、その後も低下することなくほぼ一定の値をとっている点や最大値の大きさが拘束圧に比例している点など、その挙動は正規圧密の場合と同様である。

(2) 応力径路

図 6-11 に、応力径路を示した。ただし、縦軸は軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$)、横軸は平均有効主応力 ($(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') / 3$) である。この図より、同じ K_o 圧密であっても応力径路の形状が正規圧密の場合と大きく異なり、過圧密比によってもその形状が変わっているのがわかる。すなわち、過圧密比が増大するにつれてピーク強度から限界状態に至るまでの径路長が短くなっており、特に過圧密比が 2.8 の試料になるとほとんどピーク強度と限界状態が一致している。この理由として、最大圧密履歴が同じ場合、試料の降伏曲面も同一になることから、過圧密比が大きくなるに従って応力径路が限界状態線に近いところで降伏曲面に到達するためと考えられる。なお、過圧密比が同じ試料においては正規圧密試料の場合と同様に、応力径路の形状は拘束圧の大きさに比例した相似形になることがわかる。また、過圧密試料の限界状態における応力比 ($M = q / p'$) の値についても正規圧密粘土とほぼ同じ値の約 1.05 であった。

(3) 間隙水圧

図 6-12 に、間隙水圧-軸ひずみの関係を示した。この図より、間隙水圧は軸差応力とともに増大して限界状態付近でほぼ一定値に収束し、その最大値は過圧密比が同じ場合、拘束圧大きさに比例しているのがわかる。これは、正規圧密粘土の場合と同様の傾向である。発生する間隙水圧については過圧密比の増大とともに小さくなっているが、これは、先行圧密によって供試体の間隙比が減少し、圧縮性が小さくなっているためと考えられる。ただし、過圧密比が大きくなるとは言っても、本研究で行った試験条件の範囲では砂のように間隙水圧が減少に転じることはなく、ダイレイタンスの影響は砂ほど顕著ではないことがわかる。また、過圧密比が大きくなると間隙水圧の初期の立ち上がり勾配はやや緩やかになる傾向があるが、これは、上述の供試体の圧縮性が小さくなったことと、膨潤によって供試体の応力状態が等方状態に近くなったことが主な原因であると考えられる。

(4) 中間主応力係数

図 6-13 に、中間主応力係数 (b 値 $= (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$) と軸ひずみの関係を示した。この図より、過圧密粘土についても正規圧密の場合と同様に、中間主応力係数の値は拘束圧の大きさによらずせん断開始後 0.3 程度まで急増し、それ以降は

ゆっくりと増加しながら b 値 $= 0.5$ 付近に収束するような傾向を示しているのがわかる。また、 b 値が急増し終える変曲点の辺りがちょうど限界状態に相当しており、 b 値の全体的な変動の様子についても過圧密比によらずほとんど同じであることもわかる。すなわち、中間主応力の挙動に関しては、正規圧密・過圧密の違いによらずほとんど同じになっており、さらに、限界状態における b 値の大きさ (b 値 ≈ 0.3) についても正規圧密・過圧密の違いによらないばかりか、砂の場合とも一致していることがわかる。上述のように、供試体の破壊と中間主応力の挙動には密接な関係があり、限界状態における b 値が砂・粘土さらには圧密条件を問わずほぼ同じ値になるという実験事実は、平面ひずみ条件における土の挙動を解明する際、注目すべき点であると考えている。

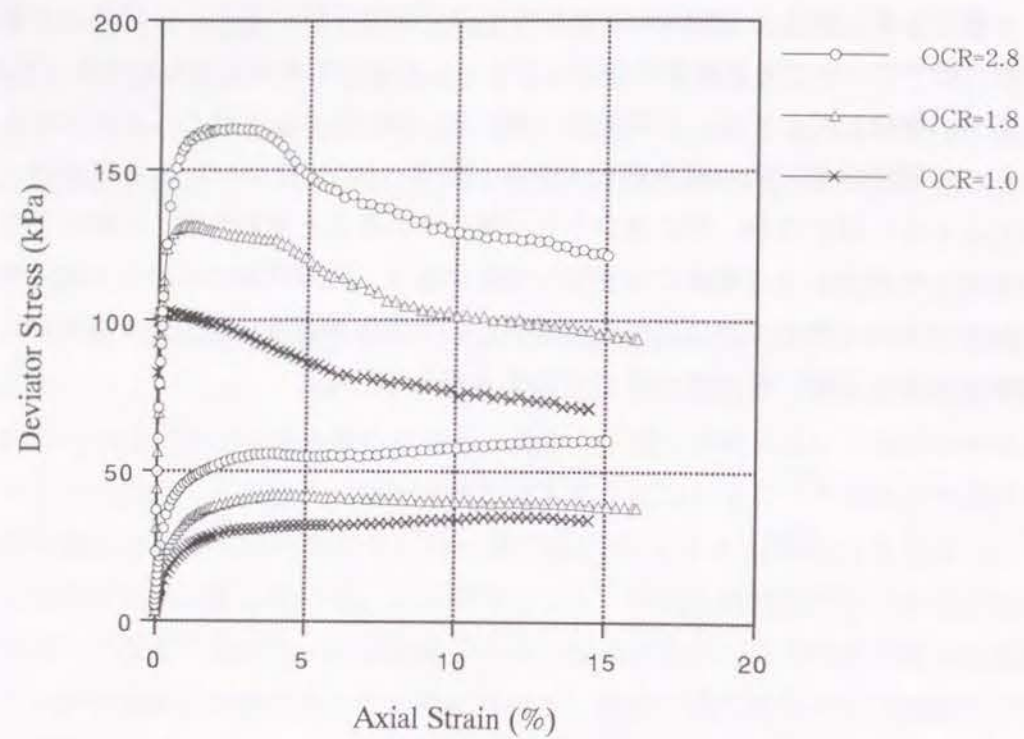


図 6-10 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

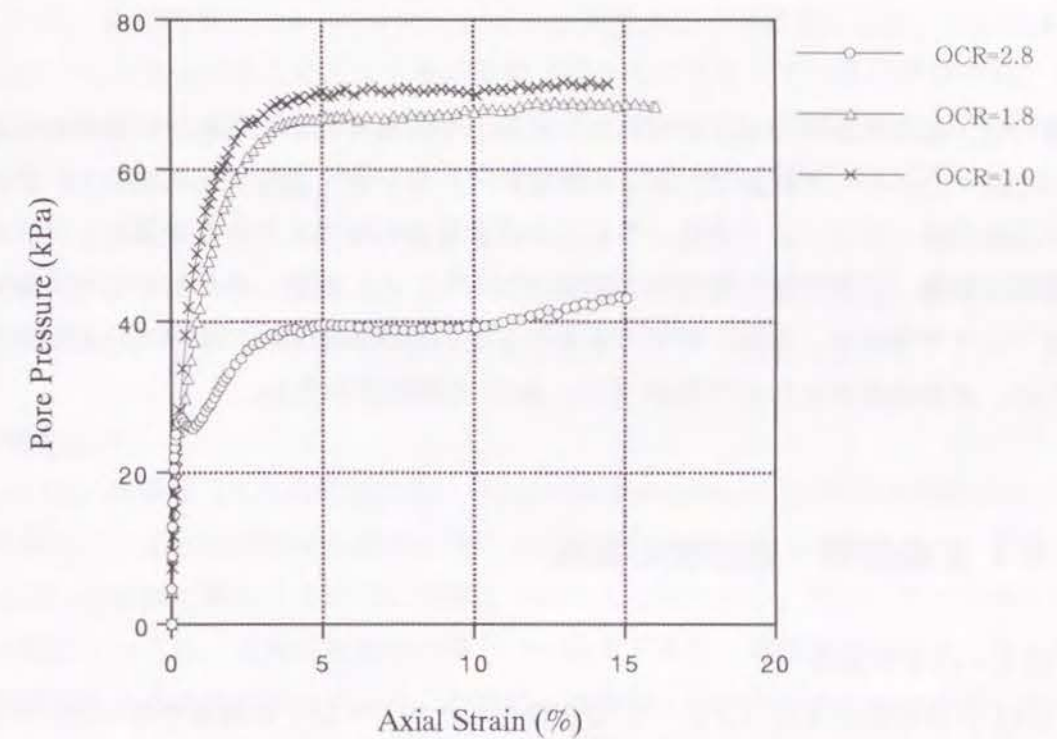


図 6-12 間隙水圧-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Pore Pressure Relationships)

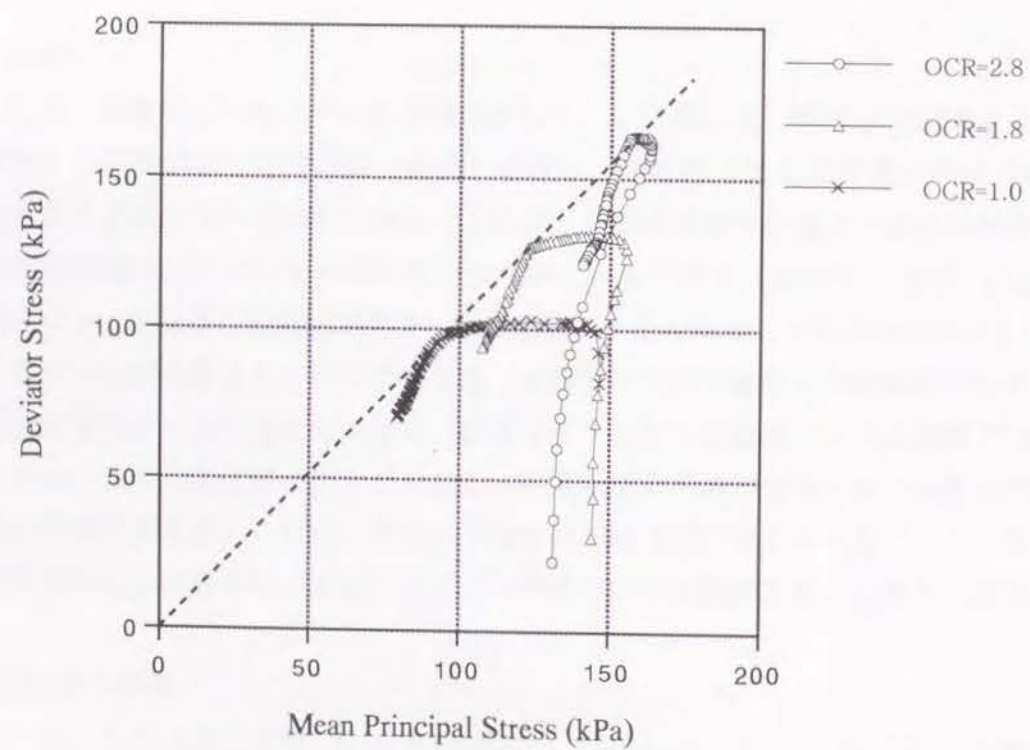


図 6-11 応力径路
(Stress Path)

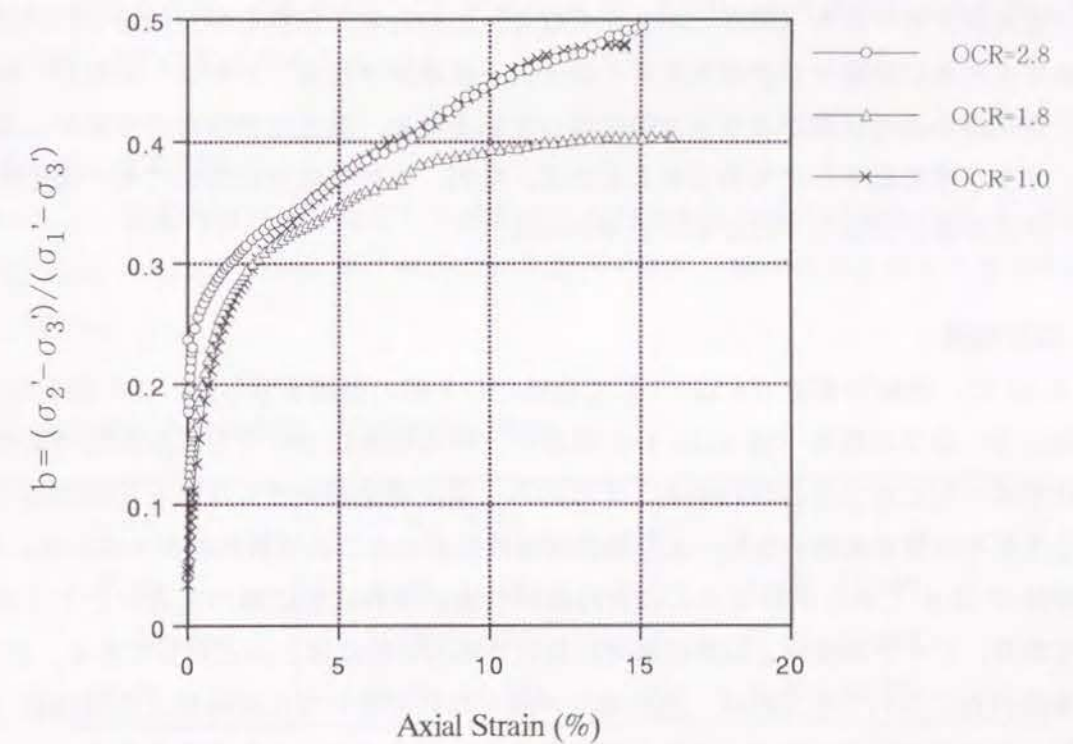


図 6-13 中間主応力係数-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. b-value Relationships)

6.4 まとめ

本章では、飽和力オリソ粘土を用いて、平面ひずみ条件における粘土の静的せん断特性について調べた。行った試験は、K_o圧密試料（正規圧密・過圧密ともに含む）の非排水静的せん断試験である。ここでは、これらの試験を通して得られた結果をもとに、圧密履歴が及ぼす影響（正規圧密と過圧密の関係について）と、粘土・砂におけるせん断特性の違いについて考察する。なお、考察の対象としている試験結果は、すべて上述したものであるため、試験条件等については表 6-01、6-02 を参照されたい。

6.4.1 正規圧密・過圧密の関係

(1) 応力-ひずみ関係

図 6-14 には初期拘束圧 (σ_{30}') で正規化した応力-ひずみ関係を示した。この図より、正規圧密粘土も含め、過圧密比によってその形状はほぼ唯一的に定まることがわかる。また、過圧密比が大きくなると最大強度も大きくなるが、逆に、初期ヤング率（初期の接線勾配）は少しずつ小さくなる傾向がある。最大強度が大きくなるのは過圧密によって供試体の密度が大きくなる（間隙比が小さくなる）ためと考えられるが、同時に供試体の剛性も高まるために初期ヤング率も大きくなることが期待できる。しかしこの場合、膨潤によって供試体の応力状態がより等方的になっているため、異方圧密特有の性質がかなり失われ、ヤング率も低下したものと考えられる。なお、中間主応力についても、過圧密比によってその挙動はほぼ同一になることがわかる。

(2) 応力経路

図 6-15 に、初期拘束圧 (σ_{30}') で正規化した応力経路を示した。この図を見ると、上述の応力-ひずみ関係（図 6-14）と同様に、応力経路についても過圧密比によってその形状が唯一的に定まることがわかる。すなわち、過圧密比が大きくなると初期の応力経路の立ち上がりの量も大きくなり、より限界状態線に近いところで折れ曲がっている。特に、過圧密比が 2.8 である試料ではこの折れ曲がり点が限界状態に極めて近いところまで到達しており、ピーク強度時と限界状態時における応力状態はほとんど同じである。よって、この特性のみに基づいて考えれば、過圧密比が高くなれば砂のせん断特性との類似点（ここではピーク強度と限界状態がほぼ同じになること）が多くなるとも考えられる。

(3) 間隙水圧

図 6-16 に、初期拘束圧 (σ_{30}') で正規化した間隙水圧の挙動を示した。この図より、間隙水圧についても過圧密比によってその挙動が唯一的に定まっているのがわかる。すなわち、間隙水圧はせん断開始後徐々に増大して限界状態付近で一定値に収束し、過圧密比が大きくなると間隙水圧の収束値は小さくなり、発生間隙水圧の初期勾配については過圧密比の大きさと逆になくなる傾向も見られる。これらの理由としては、上述のように、過圧密比が増大すると先行圧密によって供試体の圧縮性が小さくなること、また、膨潤によって供試体の応力状態が等方的になること、などが考えられる。

(4) 中間主応力

図 6-17 に、 π 平面（正八面体応力面：Octahedral Stress Plane）での応力経路を示した。この図を見ると、応力経路はせん断開始後直ちに破壊包絡線のすぐ内側に達し、その後ゆっくりとこの包絡線に漸近するように移動していることがわかる。また、ピーク強度時における b 値については、正規圧密粘土の場合 0.1 以下であり、過圧密比が大きくなるにつれて大きな値をとるようになっている。これは、圧密終了時の供試体の応力状態に起因すると考えられる。すなわち、過圧密比が大きい供試体の場合、正規圧密した供試体に比べて圧密後の応力状態がより等方的であり、 b 値の分母を与える ($\sigma_1' - \sigma_3'$) の値がせん断開始時にはあまり大きくないためであると考えられる。なお、限界状態時の b 値については、上述のように、過圧密比によらずほぼ 0.30 であり、過圧密比によらず同じ値をとることは注目すべき点である。

(5) 過圧密比との関係

表 6-03 は、初期拘束圧で正規化した軸差応力と間隙水圧の限界状態時の値（上述した図 6-10、6-12 に示したものを、平均有効主応力で考えた場合の過圧密比の値で分類したものである。

表 6-03 過圧密比と軸差応力、間隙水圧の関係

O C R	q / σ_{30}'	u / σ_{30}'
1.00	0.78 (1.00)	0.60 (1.00)
1.54	0.95 (1.26)	0.48 (0.80)
2.21	1.32 (1.73)	0.35 (0.58)

ただし、O C R：最大圧密応力時との平均有効主応力の比

() 内の値：正規圧密時を 1 とした場合のそれぞれの値の比

この表の値を見ると、初期拘束圧で正規化した軸差応力や間隙水圧の値には、供試体の過圧密比OCR (=xとする) を用いて次式のような関係がある。

$$\frac{(q/\sigma'_{30})_{OCR=x}}{(q/\sigma'_{30})_{OCR=1}} \cong 1.6^{(x-1)} \quad (6-01)$$

$$\frac{(u/\sigma'_{30})_{OCR=x}}{(u/\sigma'_{30})_{OCR=1}} \cong 1.6^{(1-x)} \quad (6-02)$$

この関係はあくまでも実験式であり、本来ならこのような定量的な検討は構成則などの観点からするのが望ましいと考えられるが、ここでは実験事実としての関係の考察のみにとどめる。

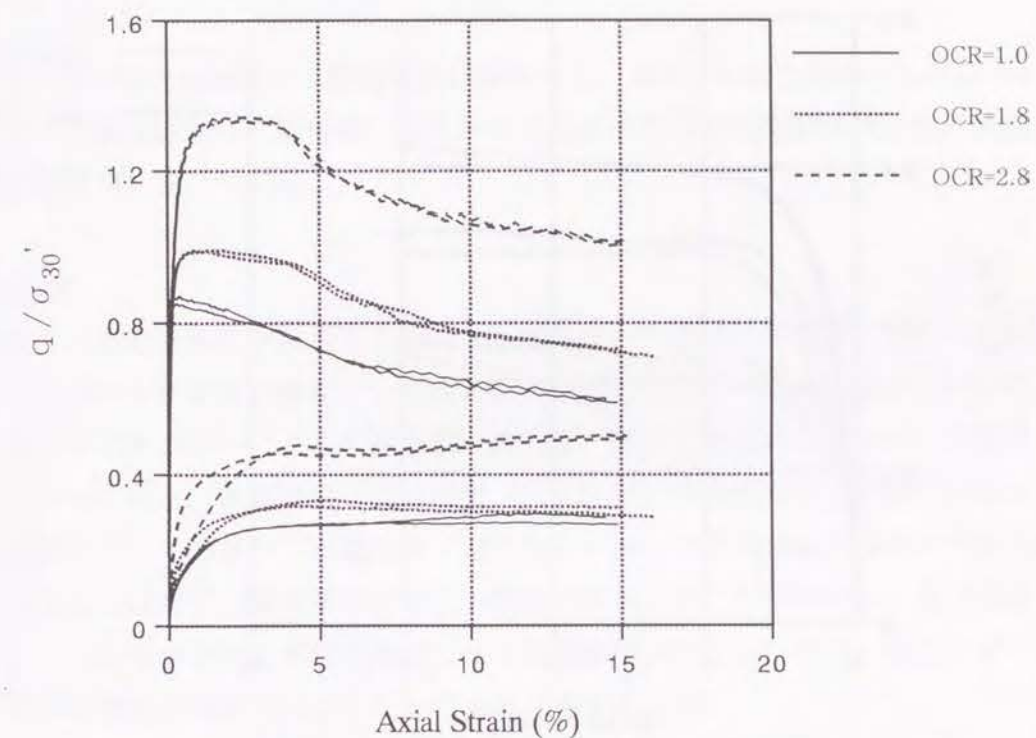


図 6-14 正規化した応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Normalized Deviator Stress Relationships)

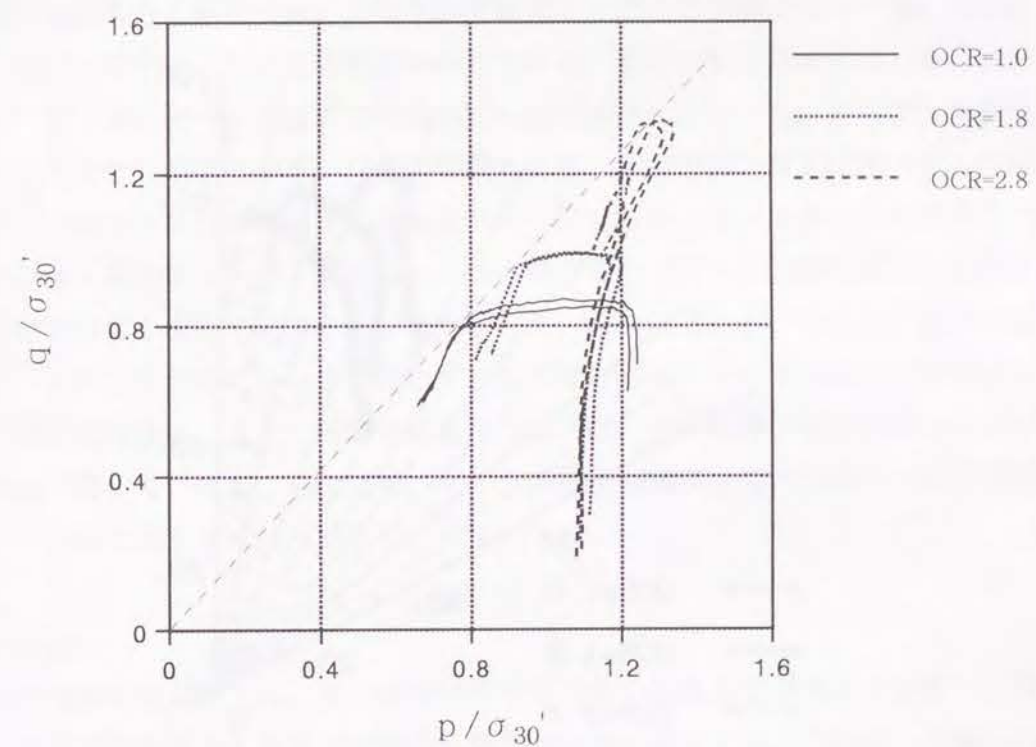


図 6-15 正規化した応力径路
(Normalized Stress Path)

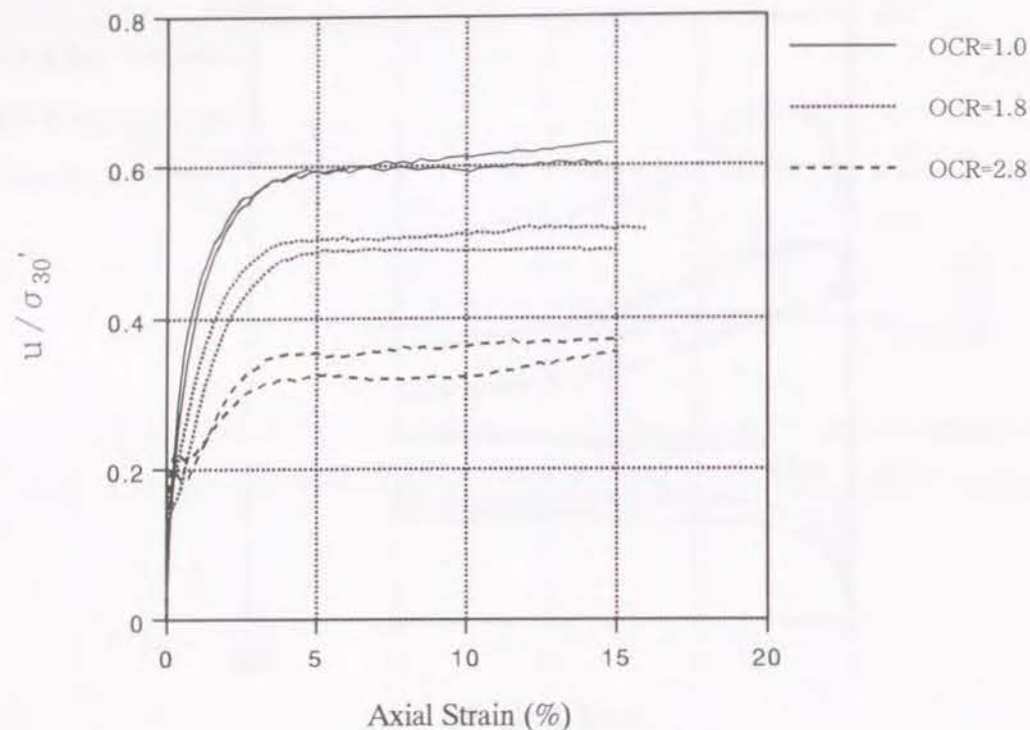


図 6-16 正規化した間隙水圧－軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Normalized Pore Pressure Relationships)

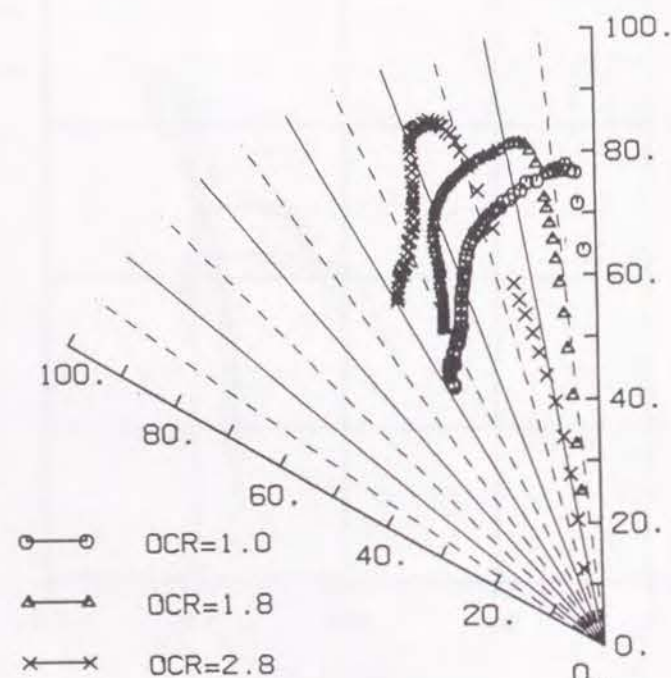


図 6-17 π 平面応力径路
(Stress Path on Octahedral Plane)

6.4.2 砂との比較

ここでは、砂と粘土の静的せん断特性の比較を行う。なお、比較の対象としているのは、第5章で述べた砂の静的せん断特性のうち、等方圧密または異方圧密された砂の非排水静的せん断の結果である。

(1) 間隙水圧

砂の場合、正の間隙水圧が発生するのはせん断初期の一部分に過ぎず、ほとんどが負の値、それとかなり大きな負の値をとりながら限界状態に至り、一定値に収束していた。また、このダイレイタンスによる体積膨張の傾向も、異方圧密された場合さらに顕著になることもわかっている。本章では、異方圧密（ K_o 圧密）されたカオリン粘土の非排水静的せん断試験を行っているが、正規圧密・過圧密にかかわらず間隙水圧は増大するのみで負の値になることはなく、限界状態ではほぼ一定値に収束することがわかる。異方圧密で過圧密状態にあるにもかかわらずせん断によって体積膨張が生じないのは、粘土のダイレイタンス特性が砂ほど顕著ではないためであると考えられる。

(2) 応力－ひずみ関係

砂の非排水静的せん断の応力－ひずみ関係は、(a) ダイレイタンスによる負の間隙水圧の影響で軸差応力と軸ひずみとの関係は直線状か下に凸の曲線になる、(b) ピーク強度と限界状態が一致する、などの特徴がわかっている。また、異方圧密すると等方圧密したもの比べて、(a) ピーク強度までの軸ひずみ量が小さくなる、(b) せん断開始直後の軸差応力の立ち上がり之急になる、などの特徴もある。本章では、異方圧密（ K_o 圧密）されたカオリン粘土の非排水静的せん断試験を行っているが、 K_o 圧密による異方性の影響で、正規圧密・過圧密を問わず極めて小さい軸ひずみでピーク強度に至っており、軸差応力の立ち上がりも極めて急である。したがって、砂のようにピーク強度と限界状態とは一致せず、これらの状態に対応する軸ひずみ量も異なるが、ピーク強度と限界状態での強度にはあまり差はない。また、中間主応力については、砂の場合、軸差応力とその増減の様子がほぼ一致しているが、粘土では、ピーク強度後も中間主応力は増大し続けて限界状態付近で一定値に落ち着く傾向がある。

(3) 応力径路

砂の非排水静的せん断では、せん断中に発生する負の間隙水圧が大きく影響し、等方圧密・異方圧密を問わずせん断開始直後から限界状態線に漸近するような応力径路となることがわかっている。一方、本章で行った粘土の非排水静的せん断では、せん断開始直後の

第7章 砂の非排水繰返し平面ひずみ挙動

7.1 概説

ここでは、構築した平面ひずみ試験システムを用いて行った砂の非排水繰返し載荷試験の結果をもとに、その力学特性について考察する。試験に用いた試料は、静的せん断の時と同じ豊浦標準砂である。また、試料の物理特性や供試体の作製方法については第4章で述べたとおりで、個々の供試体作製における詳細は前述した静的せん断の場合（第5章参照）と同じである。なお、供試体の圧密条件については、平面ひずみ条件であることを考慮して基本的には異方（ K_o ）圧密を行っているが、等方圧密（第5章の静的せん断と同様に）を行ったものもある。これは、液状化試験としてよく行われている非排水繰返し三軸試験が等方圧密条件を指定されており、これに準じた試験を行って液状化強度を比較するためである。また、異方圧密については K_o 圧密を基本とするが、静的せん断試験の場合と同様に、圧密履歴の違いが及ぼす影響についても検討するため、異なる3種類の異方圧密径路を用いて行った。

7.2 試験方法

土の非排水繰返し載荷試験の方法については、最近になってやっと地盤工学会（旧：土質工学会）でも基準化された（「土質試験の方法と解説、第7編 第10章：土の繰返し非排水三軸試験」（1990）参照）。その内容は、1987年から1988年にかけて「飽和砂の非排水繰返し試験法に関する研究委員会」において実施された第2回目の一斉試験（「飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験」（1988））の試験仕様に基いて作成されている。したがって、用いる試料としては飽和した粘着力を有しない土（砂質土など）に限定され、試験によって得ようとするものは土の液状化強度特性である。また、この地盤工学会基準では三軸試験を対象としており、等方応力状態（供試体内部にせん断応力が存在しない状態）を基準に、軸方向にのみ一定の応力振幅を正と負の両方向に同じ大きさだけ繰返し載荷する試験である。

本研究では、この一斉試験への参加を機に土の非排水繰返し載荷試験を始めたため、試験方法は一斉試験の試験仕様を大いに参考にしている。よって、以下で述べる試験方法は

急激な軸差応力の増大によりほぼ真上に立ち上がるような応力径路になる。この形状は、通常の等方圧密三軸圧縮試験などで見られるものとは大きく異なり、異方圧密（ K_o 圧密）の特有の性質であると考えられる。なお、図 6-11 からわかるように、過圧密比が大きくなるとピーク強度時から限界状態までの径路が短くなり、同じ最大圧密履歴を持つ供試体では応力径路が同じ降伏面に依存しているのが確認できる。

(4) 中間主応力

砂の非排水静的せん断の場合、供試体の密度や等方圧密・異方圧密などの試験条件によらず、せん断開始後間もなく b 値はほぼ一定（ $b=0.25$ ）になり、限界状態に至ることがわかっている。一方、粘土の非排水静的せん断では、せん断開始後直ちにピーク強度に至るが、この時の b 値は過圧密比によって異なっている（過圧密比が小さいほど b 値も小さい）。しかし、限界状態に着目すると、砂の場合のように過圧密比などの大きさによらず b 値はほぼ同じ値（ $b \approx 0.30$ ）に収束しており、極めて興味深い結果である。

ここで、供試体の破壊と中間主応力の関係について少し考察を加える。静的せん断試験での破壊をせん断面が発生した時であるとする、平面ひずみ条件では中間主応力の増大が収まった時であると考えられる。これは、せん断面の発生により、供試体の側方への膨張が最小主応力方向に集中するためであると考えられる。したがってここでは、中間主応力の増大が収まった時＝限界状態がこれに相当することになる。しかし、粘土の最大強度はせん断開始直後で生じ、限界状態よりかなり前の段階であるため、平面ひずみ条件下にある土の挙動を考える場合には注意が必要となる。ただし、上述の結果より、最大強度と限界状態強度にはそれほど大きな差はないため、強度のみを考える場合には特に問題は無いと考えて差し支えないと思われる。

最終的には独自で作成したものであるが、制御の精度や許容範囲など、試験結果に大きな影響をおよぼす事項に関してはすべて基準の範囲内であることを最初に断っておく。なお、平面ひずみ条件における土の挙動を主な対象としているため、等方圧密だけではなく異方圧密（K_o圧密）した供試体を用いた非排水繰返し載荷試験も行っている。よって、繰返し載荷による応力振幅が正の方向に偏るような（波形の中心が圧縮側に偏った）繰返し載荷も行っており、この場合、供試体の軸と45°傾いた面上でせん断応力が完全に反転するようないわゆる液状化試験にはならないことに注意する必要がある。

7.2.1 一斉試験の載荷条件との相違点

「飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験」(1988)では、繰返し載荷基準として以下のような項目を設定している。

- ・周波数 0.1Hz の正弦波
- ・繰返し荷重の第1波は圧縮側の荷重から加える
- ・圧縮側の荷重片振幅 P_c と伸張側の荷重片振幅 P_e の比は常に $0.95 \leq P_c / P_e \leq 1.05$ （一斉試験の基準では $0.9 \leq P_c / P_e \leq 1.0$ と変更された）を満足しており、かつ、これらの荷重値の和 $P_c + P_e$ は供試体の変形が進行しても $\pm 10\%$ 以下の変動とする

本研究においては、用いる供試体が（軸対称）三軸用と平面ひずみ用との2種類があること、さらに、圧密条件が等方圧密と異方圧密の2種類あることなどから、この基準の範囲内で一部載荷方式や基準の取り方を変更した。1点目は、繰返し載荷は荷重制御ではなく応力制御で行った点である。この理由は、供試体の変形が進行しても繰返し載荷による応力振幅は一定に保たれること、また、供試体の断面積が異なっても同じ応力の振幅基準で波形の乱れによる影響が判断できることなどが挙げられる。具体的には、異方圧密した試料は繰返し載荷が進むと供試体は徐々に圧縮されて断面積が増大するために荷重振幅を一定に保つ意味が薄れること、三軸用と平面ひずみ用の供試体では初期段階から断面積が異なるために荷重振幅の比や和では同じ基準として判断できないこと、などの理由による。2点目は、圧密条件を等方圧密と異方圧密の両方に設定したため、上述の繰返し載荷荷重の基準については、圧密終了時の応力状態からの変動分として対応させた点である。すなわち、繰返し載荷は基本的には応力制御で行っているが、その載荷基準としては、圧縮側の応力片振幅の増分 $\Delta \sigma_c$ と伸張側の応力片振幅の増分（減分） $\Delta \sigma_e$ とを考え、これらの比と和が常にそれぞれ上述の範囲内になるように制御した。

7.2.2 砂の非排水繰返し載荷試験手順

(1) 供試体の設置・圧密までの手順

供試体の設置までの手順については、等方圧密・異方圧密ともに、第5章で述べた静的せん断の場合と同じである。ただし、非排水繰返し載荷試験は、静的せん断試験に比べると供試体の乱れが試験結果におよぼす影響が大きいため、供試体設置直後の拘束圧が小さい時など供試体の応力条件の乱れには特に注意を払った。

供試体の飽和化については、基本的には静的せん断の場合と同じ Ampadu *et al.* (1989) の二重負圧法によったが、繰返し三軸試験やその比較のために行った繰返し平面ひずみ試験においては二酸化炭素と脱気水による方法を用いた。この手順については基本的に一斉試験の仕様に従っているが、具体的には次のようにした。すなわち、供試体に初期拘束圧の19.6kPaを加えるまでは静的せん断の場合と同じで、その後、供試体を排水（排気）状態にし、ペDESTAL側（供試体下部）より二酸化炭素を供給する。この時の二酸化炭素の供給圧は約5kPaであり、キャップ側（供試体上部）からの排気を三角フラスコに導いたパイプからの気泡で確認しながら供試体の体積分以上の二酸化炭素を供給した（時間にすると1~2時間は放置し、供試体内の不溶空気が十分排出されるよう気をつけた）。供試体内の空気を二酸化炭素に置換した後は、ペDESTAL側から脱気水を通水して供試体を飽和させた。この時も、供試体に不必要な応力履歴を与えないよう通水圧は十分小さい値（U字管を用いて水頭差で15cm程度）になるよう注意し、通水後もさらに脱気水を供試体の体積分以上流して残留する気泡なども除去するようにした。

なお、二重負圧法によって飽和させた供試体も二酸化炭素と脱気水によって飽和させた供試体も、静的せん断の場合と同様に背圧198kPaを載荷して6~7時間放置することにより、完全飽和をめざした。飽和状態の確認も、非排水状態でセル圧をゆっくりと減圧→回復する方法（第2回三軸圧縮試験実技講習会報告(1983)参照）によって Skempton の間隙水圧係数B値を求め、B値 ≥ 0.96 をもって完全飽和とみなした。

(2) 圧密の手順

圧密の手順についても、等方圧密・異方圧密ともに、基本的には静的せん断の場合と同じである。平面ひずみ状態を考える場合、異方圧密（K_o圧密）が本来的ではあるが、軸対称三軸条件との比較も一つの重要な目的であるため、等方圧密も行った（一斉試験への参加とも関連する）。異方圧密については、平面ひずみ条件を考慮して基本的にはK_o圧密を行ったが、圧密時の応力径路の依存性についても検討するため、 p' 一定応力径路や σ_3' 一定応力径路による圧密（排水圧縮）も行った。それぞれの圧密条件における応力径路の概念図を図7-01に示す。

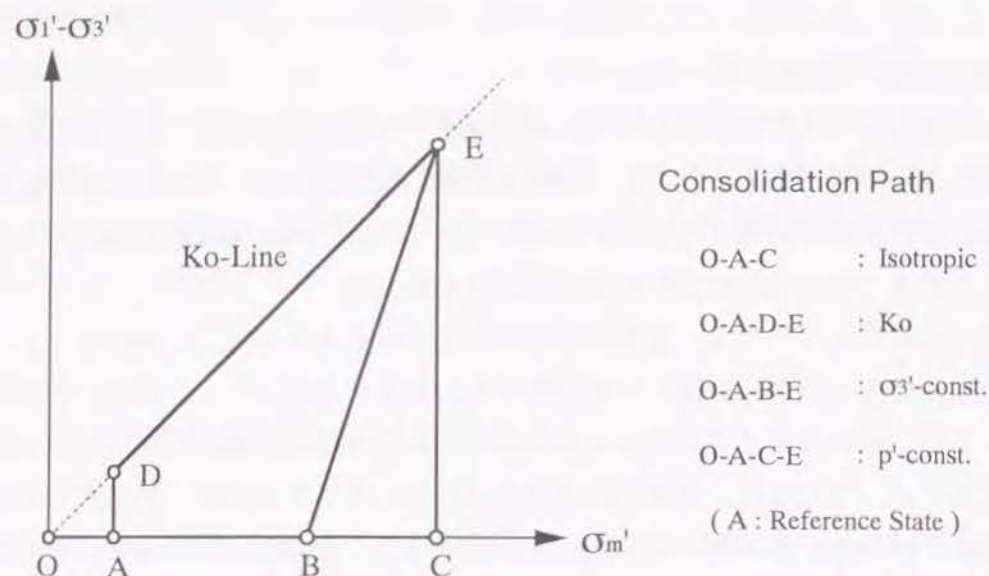


図 7-01 圧密径路
(Consolidation Path)

(a) 等方圧密

等方圧密は、静的せん断の場合と同様に負圧で行った。この理由は、負圧による拘束圧がセル室を必要としないため、等方圧密が終了してから拘束枠を取り付けることができるからである。この方法を用いると、等方圧密における供試体の体積収縮によって供試体と側方のひずみ拘束板との間に隙間ができるのを防ぐことができるが、その一方で、98 kPa を越える圧密が行えないという欠点も存在する。なお、負圧による圧密を行った場合、圧密過程が終了してから供試体を飽和させることになる。

(b) 異方圧密

異方圧密についても、その手順は静的せん断の場合と同じである。 K_o 圧密については、初期状態 ($\sigma'_3 = 19.6\text{kPa}$; 等方) から平均有効主応力一定の排水径路で基準とする応力状態 ($K=0.4$ とした) にした後、 K_o 条件を保ちながら軸圧やセル圧を増加させた。この時の軸圧の増加速度は 0.3kPa/min で、側方ひずみの変動許容範囲は $\pm 0.005\%$ 以内とし、所定の応力状態に達した後も、体積ひずみの変化速度が $10^{-4}\%/\text{min}$ 以下になるまで軸差応力を一定に保ったまま放置し、一次圧密の終了を確認してから次の段階へ進んだ。また、予備試験によりあらかじめ K_o 値を求めておき、この値を用いて K 値 ($=\sigma'_3/\sigma'_1$) 一定の径路で圧密 (排水圧縮) したものもある。この時の側方ひずみの変動は $\pm 0.008\%$ 以下であった。なお、 p' 一定・ σ'_3 一定の応力径路による圧密 (排水圧縮) については、所定の応力状態 (図 7-01 参照) まで負圧によって等方圧密した後、過剰間隙水圧が

発生しないように上述の K_o 圧密と同様の载荷速度で軸圧を増大させながらセル圧を調整する方式で行った。

(3) 非排水繰返し载荷の手順

非排水繰返し载荷は、上述のように、基本的には一斉試験の要領に準拠して行った。すなわち、圧密終了後は余分な過剰間隙水圧が発生しないよう、以下のような手順で非排水繰返し载荷を速やかに行った。まず、繰返し载荷条件として、周波数とこれに対応する周波数コード、有効拘束圧、繰返し载荷応力振幅などを入力する。これによって、出力する正弦波の波形が計算され、载荷条件の一覧表が出力される。ここで、供試体が非排水状態になっていることを確認し、ただちに非排水繰返し载荷を開始する。繰返し载荷は [ESC] キーを押すことによって終了できるので、供試体の破壊状況を見ながら繰返し载荷の終了を指示する。なお、载荷制御は荷重制御モードにある軸圧サーボへの D/A 出力によって行っているが、1 周期あたり 1000 点のサンプリングを行って供試体の応力状態を逐次計算しながら 100 点の D/A 出力によって応力制御による正弦波を与えている (データとして出力するサンプリングは各 D/A の出力直前に行い、1 周期あたり 100 点分確保した)。また、応力振幅の設定はあらかじめ測定してある 1 digit あたりの出力荷重量と供試体の初期寸法から逆算して指定するようにした。

また、砂に限っては、繰返し偏差応力をより積極的に与えるため、拘束圧を振動させる試験も行った。この場合、軸圧は圧縮側から始まる正弦波で与え、拘束圧については軸圧とは逆周期の正弦波で振動させた。

7.3 砂の非排水繰返し载荷挙動

ここでは、平面ひずみ条件における砂の基本的な非排水繰返し载荷特性を調べることを目的としている。砂の非排水繰返し载荷挙動を考える場合、液状化強度が一つの重要なパラメータとなるが、本研究では液状化強度のみならず、繰返し载荷中の変形挙動についても着目し、いくつかの条件の下で試験を行った。考慮した圧密条件としては、「飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験」(1988) などとの比較を目的として等方圧密と、平面ひずみ条件として本来的である異方圧密 (K_o 圧密など) とがある。また、通常の試験では拘束圧を一定に保って軸圧のみ繰返し载荷を行うが、ここでは、より積極的に偏差応力を作用させるために拘束圧を振動させる試験も行っている。

7.3.1 等方圧密非排水繰返し載荷

ここでは、等方圧密された飽和豊浦砂の非排水繰返し載荷試験の結果について、平面ひずみ条件で行った結果を、あわせて行った軸対称三軸条件の結果と比較しながら考察する。供試体条件ならびに試験結果の一覧を表 7-01 に示したが、拘束圧や供試体の相対密度については一斉試験での値と同じである（拘束圧：49kPa，相対密度：70%）。なお、代表的な例として図 7-02～06 に示したものは、表中で○印がついているデータである。

表 7-01 供試体条件・試験結果の一覧（等方圧密）

条 件	相対密度 D _r (%)	D A = 1 %		D A = 2 %	
		載荷応力比	載荷回数	載荷応力比	載荷回数
平 面 ひ ず み	71.9	0.344	0.68	0.346	1.8
	○ 69.5	0.248	2.1	0.244	4.3
	70.4	0.245	6.9	0.248	11
	70.2	0.239	13	0.238	20
	70.7	0.221	23	0.222	31
三 軸	70.0	0.229	3.6	0.214	4.8
	○ 67.6	0.212	5.7	0.193	6.7
	69.7	0.151	15	0.142	16
	67.3	0.145	28	0.148	29

(1) 応力経路

図 7-02 に、平面ひずみ試験と三軸試験における応力経路を示した。ここで、縦軸は偏差応力（ $\sigma_1' - \sigma_3'$ ），横軸は平均有効主応力（ $(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') / 3$ ），付記した数字は載荷回数である。これらの図を見ると、応力経路は、載荷の進行にともなう間隙水圧の増大により平均有効主応力が徐々に減少し、その圧縮端または伸張端が破壊線に到達すると応力経路も破壊線に沿ったループを描くようになるのがわかる。また、この破壊線は、等方圧密非排水静的せん断で求められる破壊線（限界状態線）にほぼ一致していた。ここで、応力経路が破壊線に到達した時について考えると、この時の過剰間隙水圧の発生量は応力経路の横軸方向の変化量（つまり、平均有効主応力の減少量）に相当するこ

とより、軸差応力がゼロの状態では過剰間隙水圧が拘束圧に等しくなったものと見なせる。すなわち、この段階で供試体は液状化したと考えてよい。次に、試験条件の違いによる差異については、三軸試験で液状化後の応力振幅の減少が顕著であるのに対して、平面ひずみ試験の場合にはほとんど応力振幅が減少していない点が注目される。これは、平面ひずみ条件では拘束棒によって供試体の側方変形が拘束されているため、液状化しても供試体の剛性がいくらか保たれることによると考えられる。なお、これらの供試体の応力経路は、試料が液状化した後いくぶんその中心が圧縮側に偏っているが、試料によってはこのような傾向を示すものがいくつかあった。この原因については定かではないが、試験機のサーボシステムのループゲインが低下したため、圧縮側の追従が悪くなったためではないかと思われる。

(4) 応力-ひずみ関係

図 7-03 に、平面ひずみ試験と三軸試験における応力-ひずみ関係を示した。ここで、縦軸は偏差応力（ $\sigma_1' - \sigma_3'$ ）であり、付記した数字は繰返し載荷回数である。これらの図より、応力-ひずみ関係は、載荷の初期段階では傾き一定の直線状であり、載荷が進行するにつれて次第にループを描くようになっていくのがわかる。これは、載荷の初期段階では供試体がほぼ弾性的な状態にあり、載荷が進行するにつれて次第に塑性変形が増大していくことを示していると考えられる。ここで、軸ひずみ振幅が圧縮側よりも伸張側に大きく発達しているのがわかるが、これは用いた試験装置が下部載荷方式であることによるものと考えられる。次に、試験条件の違いによる影響については、液状化に到達するまでの軸ひずみ振幅に大きな差異が見られる。すなわち、三軸試験では初期液状化まで軸ひずみはほとんど発達していないが、平面ひずみ試験では載荷の初期段階から軸ひずみ振幅が発達している点が大きく異なっている。さらに、平面ひずみ試験では供試体が液状化した後も軸ひずみ振幅はそれほど急激に発達していないが、三軸試験の場合はかなり急激に軸ひずみ振幅が増大している。これらの相違いは、拘束棒の有無による側方拘束の違いに起因すると思われる。つまり、三軸試験では拘束棒による側方拘束がないため、液状化すると供試体の剛性が急激に下がって軸方向への変形も急激に大きくなるものと考えられる。なお、先にも述べたように、伸張側への軸ひずみ振幅が大きくなるため、描かれるヒステリシス・ループにもこの影響が現れているが、このループによって囲まれる部分の面積（塑性仕事量に相当する）もそれ以上に伸張側の方が大きくなっている。これは、非排水繰返し載荷において伸張履歴が供試体の剛性低下に大きな影響を及ぼすことを示しているものと考えられる。

(5) 間隙水圧-軸ひずみ関係

図 7-04 に、平面ひずみ試験と三軸試験における間隙水圧と軸ひずみの関係を示した

(付記した数字は繰返し载荷回数)。これらの図より、間隙水圧は最初、軸ひずみ振幅の発達とともに徐々にその大きさと振幅が増大し、その最大値が拘束圧付近に達すると軸ひずみ振幅の急激な増大とともに振動するのがわかる。この、間隙水圧が拘束圧に等しくなり（つまり有効拘束圧がゼロになる）、軸ひずみが大きく振動する状態がいわゆる液状化であると見なせる。試験条件の違いによる影響については、液状化後の間隙水圧振幅が、三軸試験では比較的すみやかに小さくなっていくのに対して、平面ひずみ試験では液状化後もかなり大きく発達している点が注目される。さらに、軸ひずみの挙動についても、三軸試験では液状化後急激に軸ひずみ振幅が発達しているのに対して、平面ひずみ試験では比較的ゆっくりと同じような割合で軸ひずみ振幅が増大しているのも大きな相違点である。これらの違いは、やはり拘束圧の有無に起因すると考えられるが、平面ひずみ条件では、側方拘束によって液状化後も供試体の剛性がある程度維持され、除荷時に有効拘束圧を保ちながら（すなわち間隙水圧の振幅を維持しながら）軸ひずみの急激な増大を抑制するものと考えられる。

(6) 中間主応力-軸ひずみ関係

図 7-05 に、平面ひずみ試験特有の中間主応力の影響を見るため、 π 平面での応力径路を示した。この図を見ると、平面ひずみ条件での非排水繰返し载荷ではあるが中間主応力はほとんど発現していないのがわかる。これは、平面ひずみ条件ではあるが、供試体は等方圧密されており、その上、载荷した軸差応力も静的せん断強度に比べるとはるかに小さいためであると考えられる。しかし、上述の応力-ひずみ関係や軸ひずみ-载荷回数のグラフで圧縮側の軸ひずみの発現が抑制されていたこと考えると、拘束圧の及ぼす影響は無視できないものと考えられる。中間主応力の影響は土の平面ひずみ挙動を考える上で一つの重要な指標になるため、この後で行う異方圧密した飽和砂の非排水繰返し平面ひずみ試験の結果に注目したい。

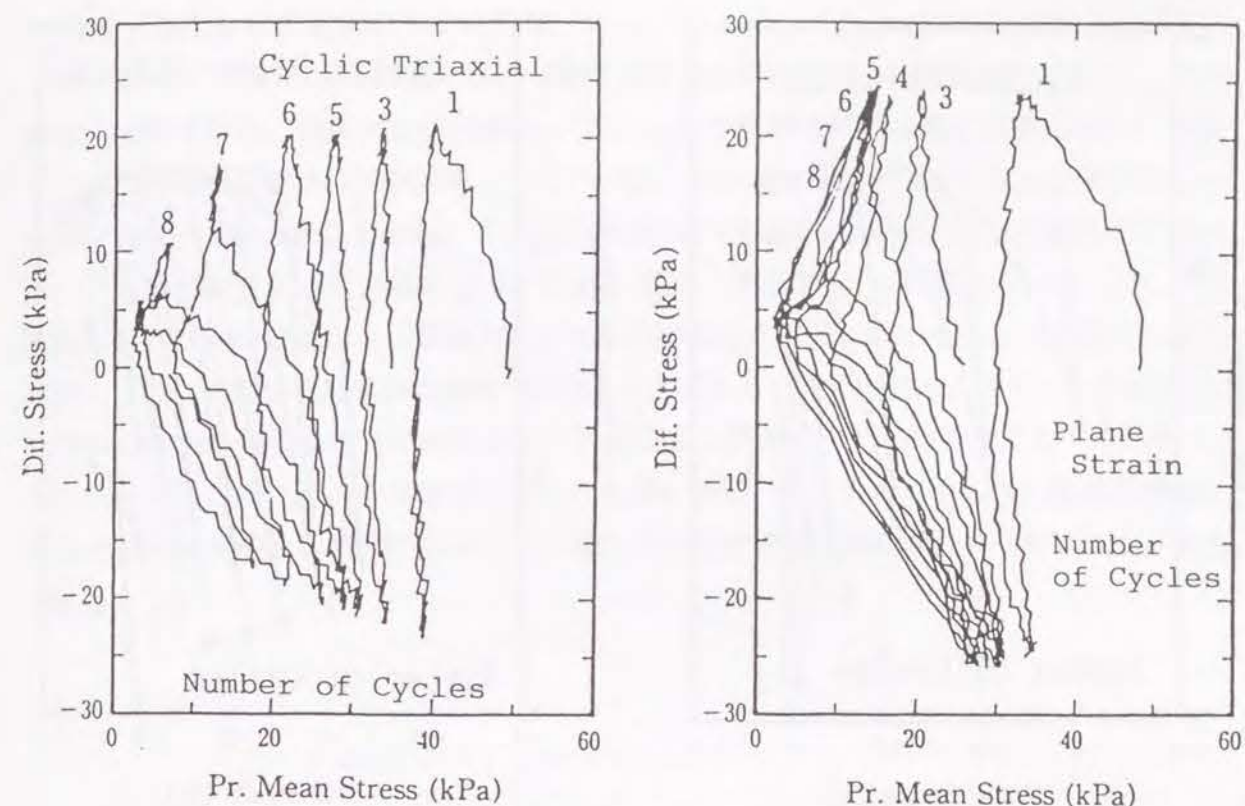


図 7-02 応力径路
(Stress Path)

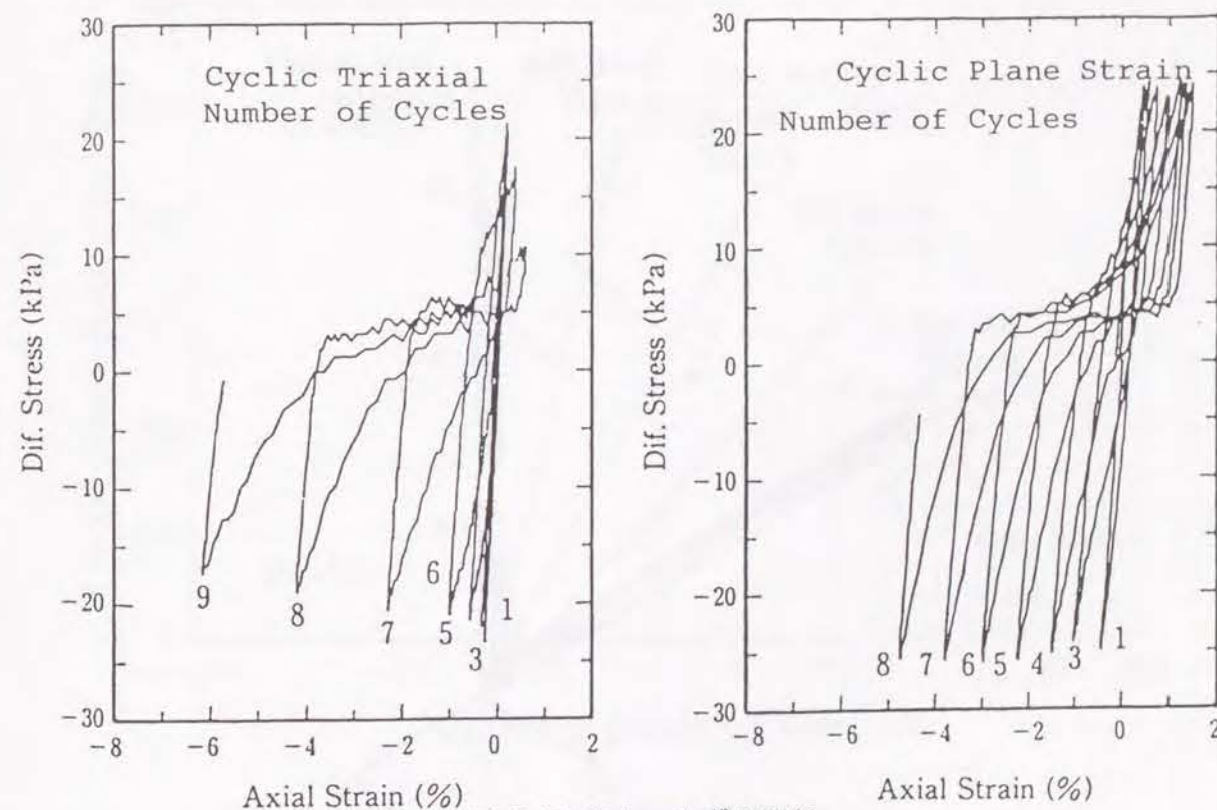


図 7-03 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

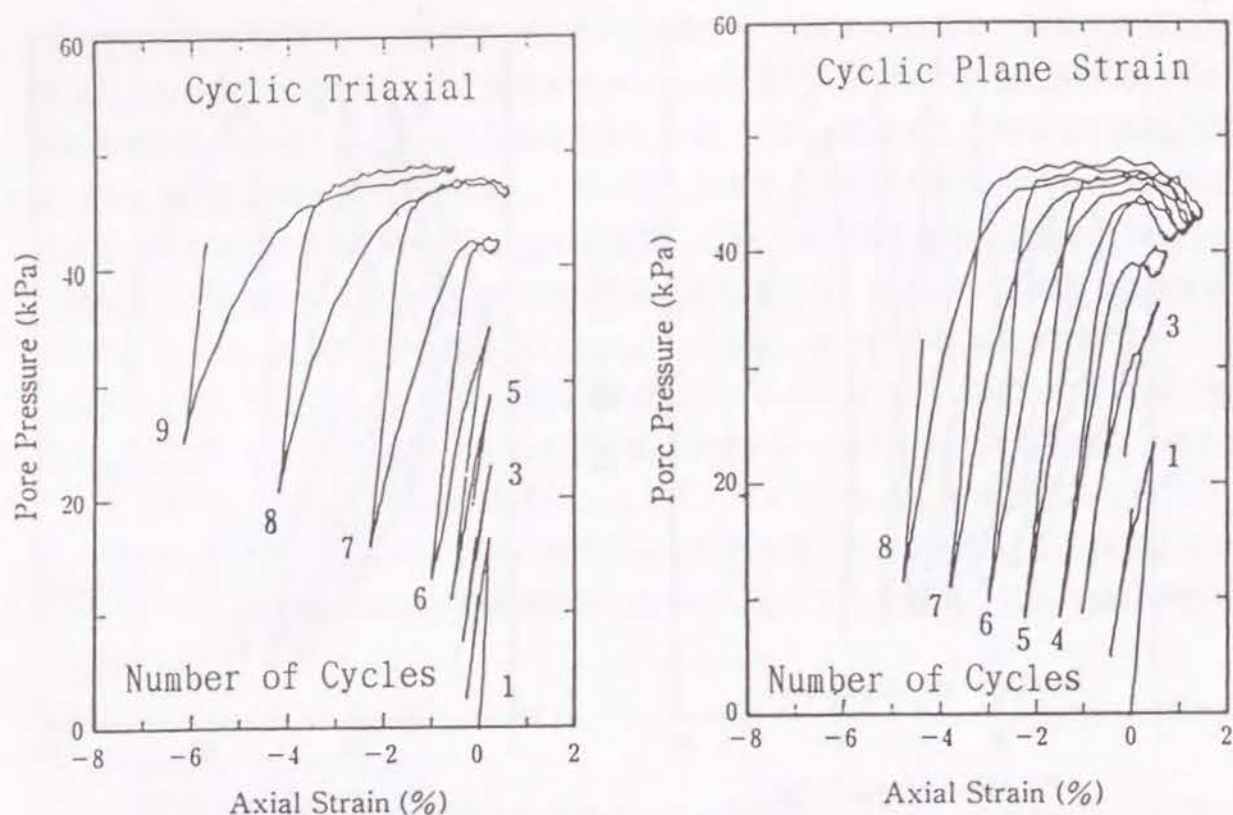


図 7-04 間隙水圧-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Pore Pressure Relationships)

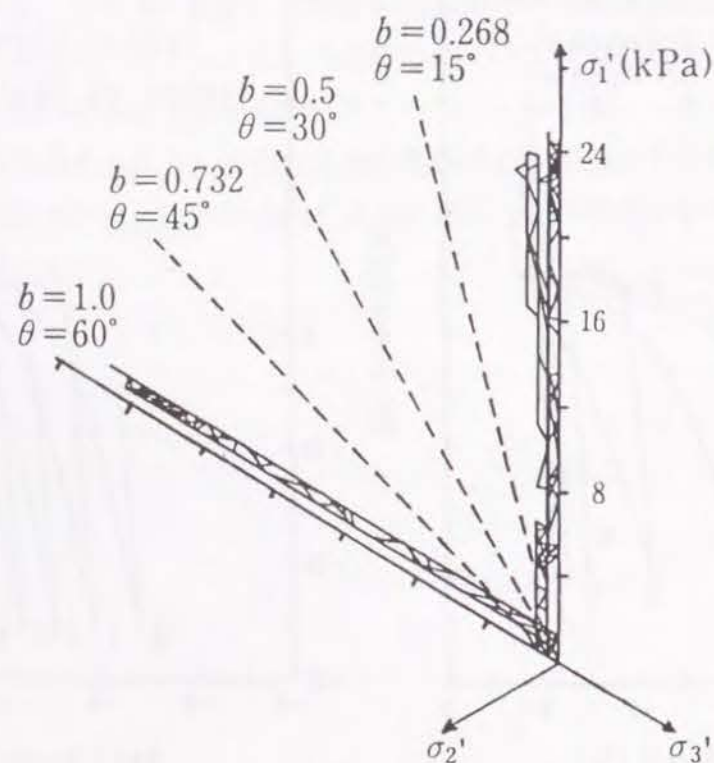


図 7-05 π 平面応力径路
(Stress Path on Octahedral Plane)

(7) 非排水繰返し载荷強度

図 7-06 に、平面ひずみ試験と三軸試験における非排水繰返し载荷強度を示した。この図で、縦軸は繰返し载荷応力比 ($\sigma_d / 2\sigma_c'$) で横軸は繰返し载荷回数 (N_i) である。また、繰返し破壊の判断基準としては、ひずみ両振幅 DA が 2% になった場合としている。通常、非排水繰返し破壊の基準としてはひずみ両振幅 $DA = 5\%$ とする場合が多いが、平面ひずみ試験では上述の応力-ひずみ関係 (図 7-03) や間隙水圧 (図 7-04) の挙動を見ればわかるように、間隙水圧が拘束圧の大きさに近づいてもほとんどひずみ振幅が増大しない (理由は拘束枠の影響であると考えられる) ためである。さて、この図より、両者の非排水繰返し強度を比較すると、平面ひずみ強度の方が三軸強度よりやや大きく、その比は約 1.2 とほぼ一定の比率であることがわかる。すなわち、静的せん断強度特性と同様に、非排水繰返し载荷においても平面ひずみ条件の方が強度が大きくなるものと考えられる。

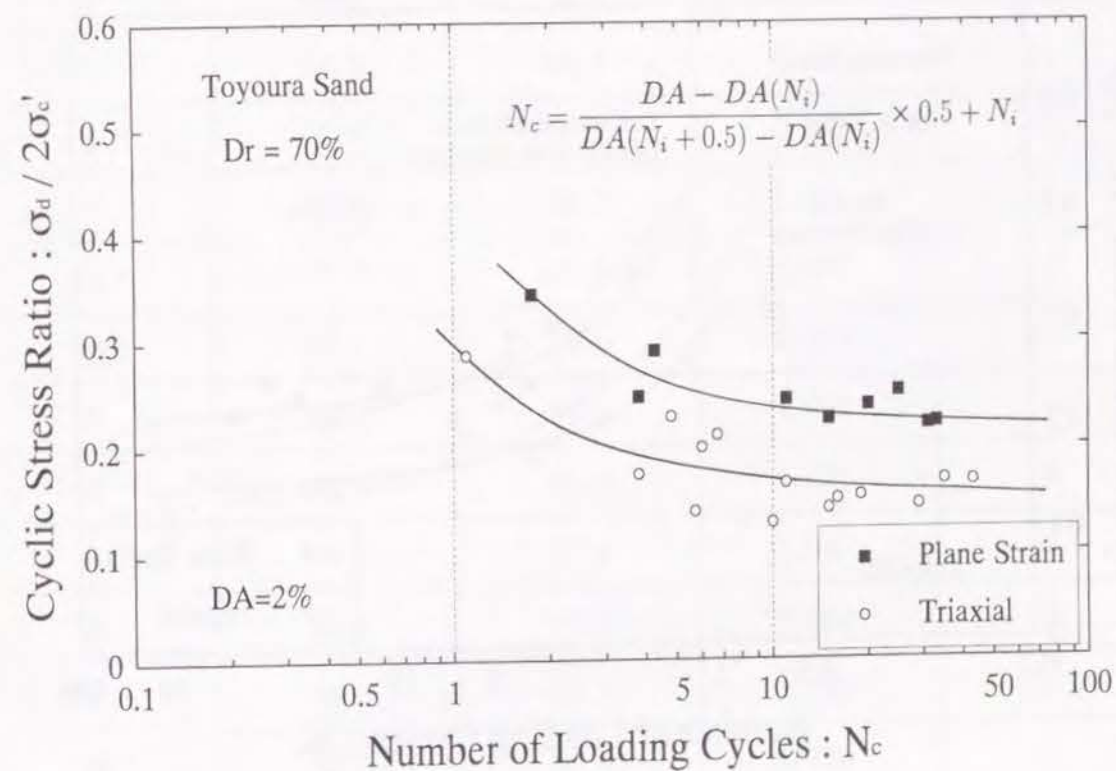


図 7-06 非排水繰返し载荷強度
(Undrained Cyclic Strength)

図 7-07 には、ひずみ両振 $DA=2\%$ の場合における本研究の結果を、他機関における同種の試験結果（ここでは、Tatsuoka *et al.* (1986b) を参照した）を比較したものである。繰返し三軸試験の結果については、ここに示した Tatsuoka *et al.* (1986b) の結果は相対密度がやや異なる ($Dr=75\%$) ものの、本試験結果にかなり近い非排水繰返し載荷強度を示しているのがわかる。強度曲線としては、本試験結果の方が Tatsuoka *et al.* (1986b) の結果よりやや傾きが緩やかになる傾向があるが、これは用いた試験装置の特性によるものと考えられる。次に、繰返し平面ひずみ試験の結果であるが、試験方法としては全く異なるが供試体の境界条件としては平面ひずみ条件である中空ねじり試験の結果（Tatsuoka *et al.* (1986b) の結果ら： $DA=3\%$ の結果しか見あたらなかった）と比較する。これらは破壊の基準としているひずみ両振幅はやや異なるものの、試験結果としてはかなり近い。先に示した試験装置の特性（本試験結果では強度曲線の傾きが緩やかになる）などを考慮すると、非排水繰返し載荷に関しては平面ひずみ強度と中空ねじり強度がほぼ同じになると考えられる。この結論は、静的せん断と非排水繰返し強度との違いはあるものの、Pradhan *et al.* (1988) の平面ひずみ試験の静的せん断強度と中空ねじり試験による単純せん断強度とはかなりよい一致を示すという報告とも関連し、十分妥当性のあるものと考えている。

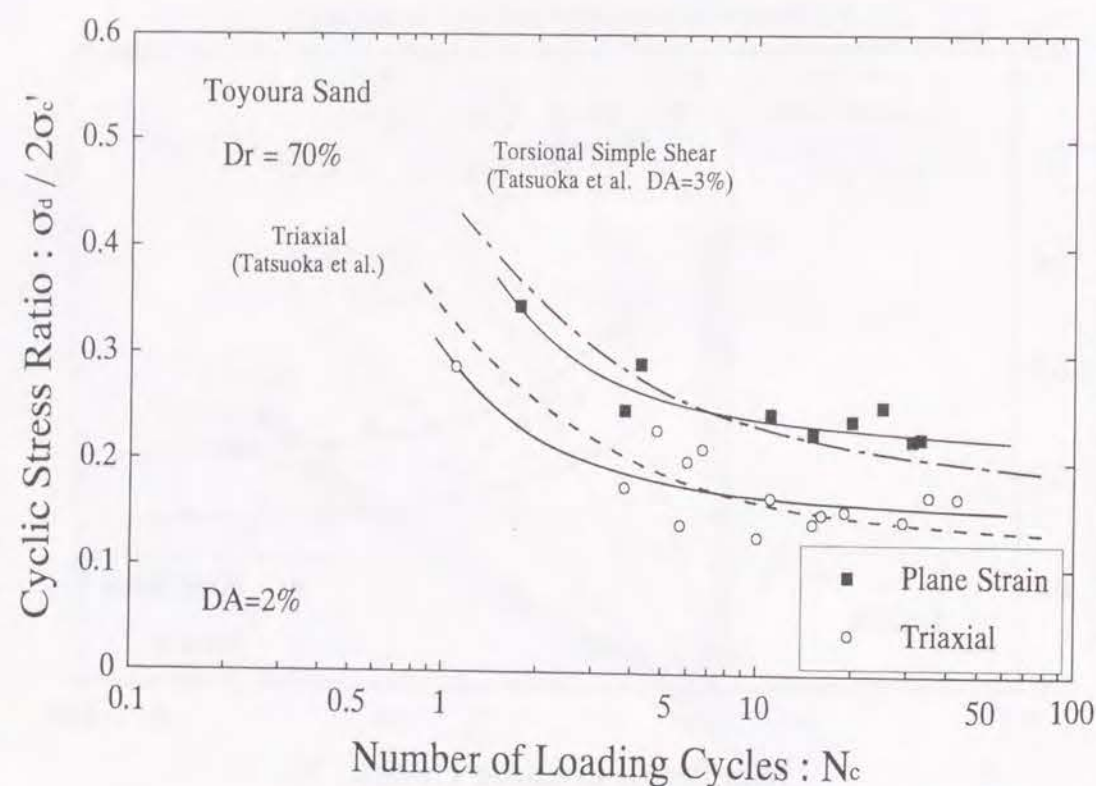


図 7-07 非排水繰返し載荷強度の比較
(Comparison of Undrained Cyclic Strength)

7.3.2 異方圧密非排水繰返し載荷

ここでは、異方圧密された飽和豊浦砂の非排水繰返し載荷試験の結果について、試験結果をもとに考察する。試験条件ならびに供試体条件の一覧を表 7-02 に示したが、異方圧密については第 5 章の静的せん断の場合と同様に、 K_o 状態を基本としながら圧密履歴の影響についても考慮した。すなわち、圧密終了時の応力状態は同一とし、(a): 通常の K_o 圧密（側圧制御により側方変形を拘束するもの）の他に、(b): p' 一定の応力径路、あるいは (c): σ_3' 一定の応力径路で排水圧縮したものの計 3 種類の異方圧密を行った。詳細については第 5 章の異方圧密の項を参照されたい。なお、ここではまず、 K_o 圧密した供試体による試験結果を示しながら、異方圧密飽和豊浦砂の非排水繰返し載荷挙動について考察する。そして次に、異なる 3 種類の異方圧密履歴をもつ供試体についての非排水繰返し載荷特性を、軸ひずみや間隙水圧の発達特性をもとに考察する。

表 7-02 試験条件・供試体条件の一覧（異方圧密）

圧密径路 (一定)	相対密度 Dr (%)	拘束圧 p_o' (kPa)	載荷応力比 q_d/p_o'	繰返し載荷回数 N_c
K	66.5	46.9	0.948	10
σ_3'	58.2	51.7	0.981	11
p'	57.9	50.1	0.947	6
K	63.4	98.7	1.007	11
σ_3'	66.7	104.8	0.973	9
p'	71.1	98.6	0.967	14
K	69.2	96.1	1.090	6
K	66.2	95.8	1.071	8
K	66.5	97.1	1.042	11
K	68.9	97.6	0.986	65
K	69.3	95.7	1.006	60 <
K	69.0	96.5	1.020	12
K	67.2	96.8	1.015	34

(1) 間隙水圧－載荷回数関係

図 7-08 に、K_o 圧密した試料の間隙水圧と載荷回数割合（破壊時を 100とした時の割合）の関係を示した。この図より、間隙水圧は繰返し載荷が始まると振幅一定のまま徐々に増大し、その最大値は拘束圧付近で収束しているのがわかる。この時、供試体の有効拘束圧はほぼゼロになっており、また、間隙水圧の振動波形が乱れていることから試料は液状化しているものと考えられる。これらの傾向は、等方圧密試料の場合と同様であり、間隙水圧が平均有効主応力ではなく拘束圧の値に一致した時に供試体が液状化することを示しているものと考えられる。ただし、間隙水圧の波形が載荷の初期段階からあまりきれいな形になっていないが、これは、非排水繰返し載荷時に軸差応力の反転が生じていること（後述）が原因ではないかと考えられる。なお、 p' 一定・ σ_3' 一定の圧密履歴を与えた供試体の挙動については、K_o 圧密の試料と顕著な相違はなかった。

(2) 軸ひずみ－載荷回数関係

図 7-09 には、軸ひずみと載荷回数割合（破壊時を 100とした時の割合）の関係を示した。この図より、軸ひずみ振幅の中心の値（すなわち、残留ひずみ）が載荷回数とともに大きくなっているのがわかる。これは、異方圧密によって供試体が初期せん断を受けているためと考えられ、等方圧密の場合とは大きく異なる点である。この点を除けば、軸ひずみの発達状況や間隙水圧との関係などはほとんど等方圧密の場合と同じであり、顕著な差はないものと考えられる。すなわち、軸ひずみは最初のうち一定の小さな振幅で振動しているが、間隙水圧の波形が乱れる辺りから軸ひずみの振幅は徐々に増大し、やがて破壊に至っている（破壊の定義は異方圧密の場合も軸ひずみの両振幅で 2%とした）。また、間隙水圧の増大に伴って供試体の剛性は低下し、その値が拘束圧に等しくなった時に試料は液状化している。なお、間隙水圧の場合と同様に、軸ひずみの挙動についても、 p' 一定・ σ_3' 一定の圧密履歴を与えたものと K_o 圧密したものとで顕著な相違は見られなかった。

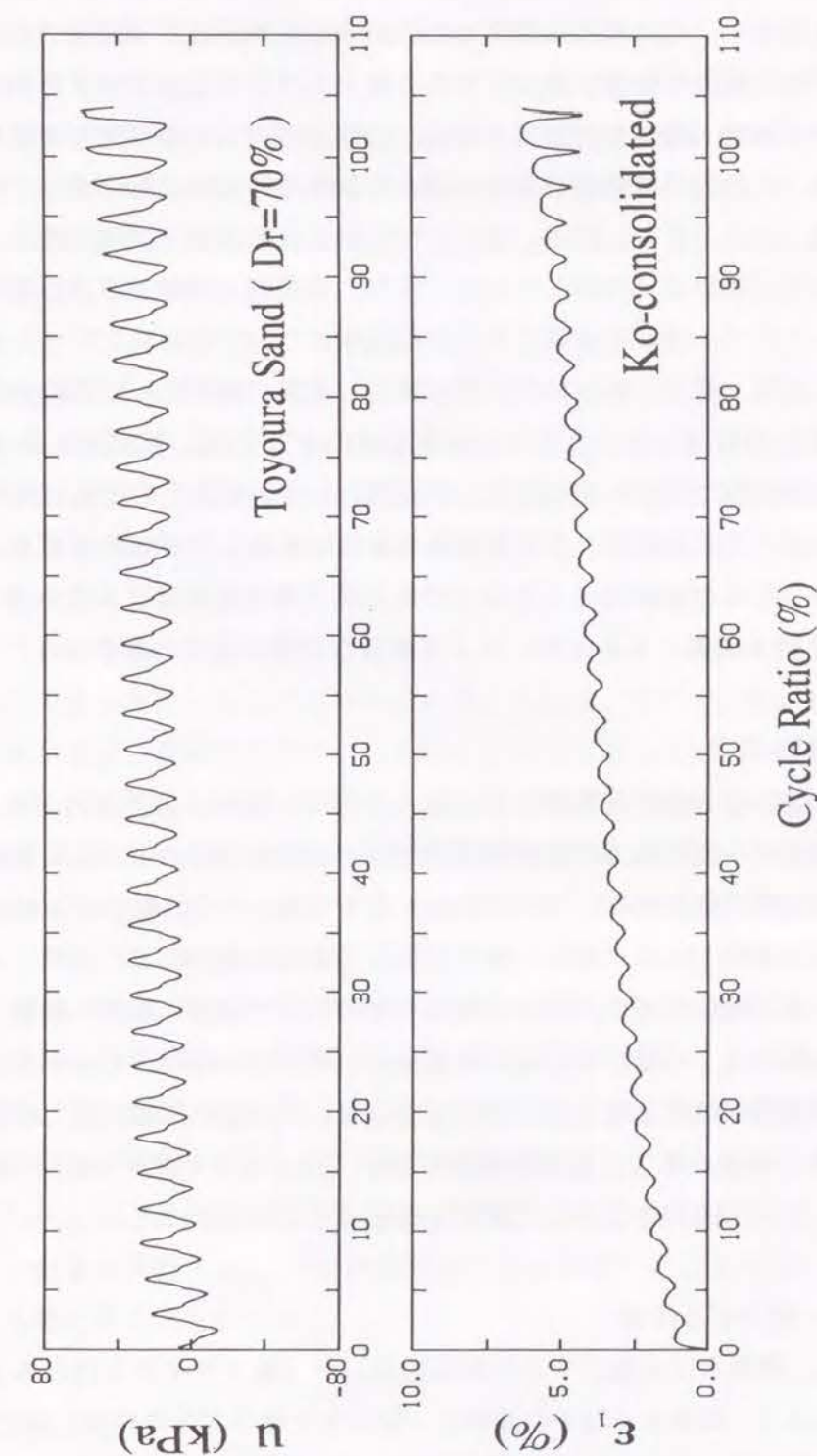


図 7-08 間隙水圧－載荷回数割合
(Cycle Ratio v. s. Pore Pressure)

図 7-09 軸ひずみ－載荷回数割合
(Cycle Ratio v. s. Axial Strain)

(3) 応力径路

図 7-10 には応力径路を示した。ここで、縦軸は偏差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$) で横軸は平均有効主応力 ($(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') / 3$)、第 1 サイクル目には 1 の数字が付けてある。この図を見ると、応力径路は载荷の始めから圧縮側が限界状態線に沿うようなループを描き、わずかに限界状態線に近づくもののほとんど定常的なループを描いているのがわかる。供試体が破壊（液状化）に至るのは、圧縮側の応力径路が完全に限界状態線に一致した時であり、この限界状態線は異方圧密非排水静的せん断試験によって求めたものと一致している。また、さらに詳細に調べると、応力径路のループは圧縮端よりも伸張端の方が大きく限界状態線側に移動しており、また、伸張端では軸差応力の反転が生じているのがわかる。ここで、液状化破壊に至った供試体について本研究で行った他の試験結果も併せて調べた結果、異方圧密試料の非排水繰返し破壊（液状化）には軸差応力の反転が不可欠であることがわかった。兵頭らの研究 (1991) によれば、初期せん断を受けた土の非排水繰返し三軸試験で液状化を引き起こす要因として軸差応力の反転は不可欠であると報告されているが、これは平面ひずみ条件にもあてはまることが確認できる。これらの特性は、等方圧密したものとは大きく異なっているが、異方圧密履歴の違い (p' 一定排水圧縮・ σ_3' 一定排水圧縮・ K_0 圧密) による顕著な相違は見られなかった。

(4) 応力-ひずみ関係

図 7-11 には応力-ひずみ関係を示した。ここで、縦軸は偏差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$) であり、第 1 サイクル目のみ 1 の数字を付けた。この図を上述の等方圧密の場合と比較すると、繰返し载荷時に描かれるヒステリシス・ループは小さく、軸ひずみは圧縮側のみに発達している点が注目される。また、個々の载荷によって描かれるヒステリシス・ループの大きさはほとんど同じであり、軸ひずみは一定の割合で増大しながら破壊（液状化）に至っている点も異なっている。さらに、破壊後は伸張側でのみ軸ひずみが大きく変動し、圧縮側での変動は液状化前とほとんど変わっていないが、これは軸差応力の反転による影響と考えられる。なお、応力-ひずみ関係についても、 p' 一定・ σ_3' 一定の圧密履歴を与えたものと K_0 圧密したものとで顕著な相違は見られなかった。

(5) 間隙水圧-軸ひずみ関係

図 7-12 に、間隙水圧と軸ひずみの関係を示した（第 1 サイクル目のみ 1 の数字を付けた）。この図より、間隙水圧はその振幅は一定のまま軸ひずみの発達と共に徐々に増大し、最大値が拘束圧付近に達すると軸ひずみ振幅の増大とともに間隙水圧の値も大きく振動するようになるのがわかる。これらの特徴は、軸ひずみの発達する方向が異なっているものの等方圧密の場合にも共通するものである。しかしその一方で、個々のサイクルに着目すると、その様相は大きく異なっている。すなわち、異方圧密試料の場合、最初の 1 サイ

クルを除くと圧縮時に間隙水圧が減少しており、この傾向は供試体が液状化するまで続いている。この原因としては、土粒子構造の異方性に起因するダイレイタンスの影響が考えられる。つまり、異方圧密によって土粒子の噛み合わせがかなり密になっているため、供試体に圧縮応力が加わった場合、体積の圧縮よりもダイレイタンスによる体積膨張の方が顕著に現れるものと考えられる。また、1 波目のサイクルの最初の部分に関しては、通常の静的せん断に見られるようにわずかに圧縮による間隙水圧の増加が見られるが、ダイレイタンスの発現により間もなく減少に転じるものと考えられる。なお、異方圧密履歴の違い (p' 一定排水圧縮・ σ_3' 一定排水圧縮・ K_0 圧密) による差は、間隙水圧挙動においても特に見られなかった。

(6) 中間主応力-軸ひずみ関係

図 7-13 に、中間主応力と軸ひずみの関係を示した。ここで、縦軸は中間主応力 ($\sigma_2' - \sigma_3'$) で、第 1 サイクル目のみ 1 の数字が付けてある。この図を見ると、上述の等方圧密の場合とは異なり、中間主応力が载荷の初期段階から明確に現れているのがわかる。これは、異方圧密によって形成された供試体の土粒子骨格が平面ひずみ条件として本来的な状態になっていること、また、载荷した繰返し応力の大きさも中間主応力が発達するのに適度な大きさであったことなどによるものと考えられる。そこで、発現している中間主応力の大きさを見ると、最初の 1 サイクルを除くと中間主応力もほぼ一定の振幅で振動しているのがわかる（もちろん、繰返し载荷条件として軸差応力振幅も一定である）。このことは、次の図 7-14 の π 平面での応力径路を見てもわかるように、中間主応力係数 b 値 ($= (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$) の値が繰返し载荷中ほぼ一定であるという事実に対応する。また、この時の b 値は約 0.25 であり、静的せん断試験における破壊時の値に一致している。従来、平面ひずみ条件での非排水繰返し载荷試験はほとんど行われていないが、この事実は平面ひずみ条件にある土の挙動を考えていく上で極めて重要な結果であると考えている。なお、最初の 1 サイクルの軸圧载荷過程の部分に関しては、 K_0 圧密によってその発現が抑制されていた、平面ひずみ状態として本来発揮すべき中間主応力が一気に発現したため、その振幅が大きくなったものと考えられる。また、異方圧密履歴の違い (p' 一定排水圧縮・ σ_3' 一定排水圧縮・ K_0 圧密) による差は、中間主応力の挙動においても特に見られなかった。

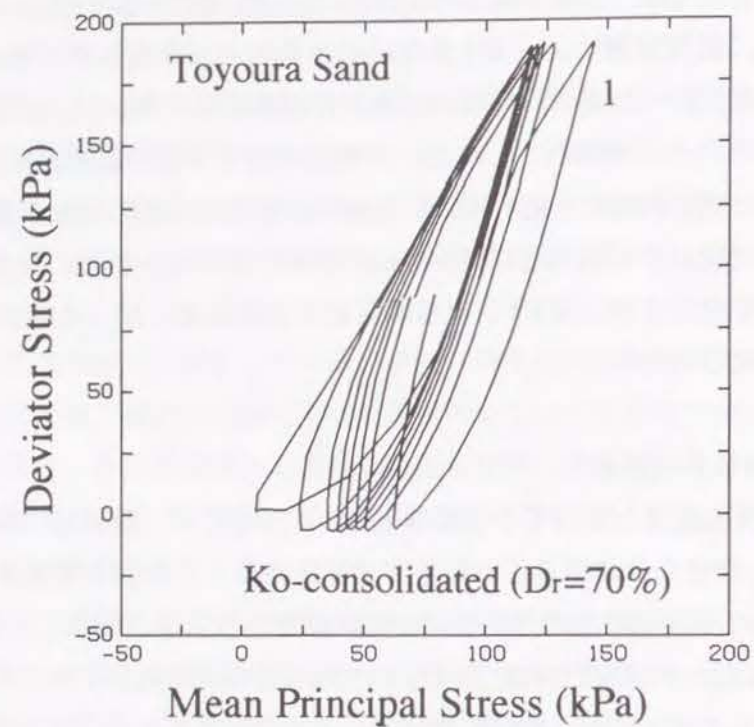


図 7-10 応力径路
(Stress Path)

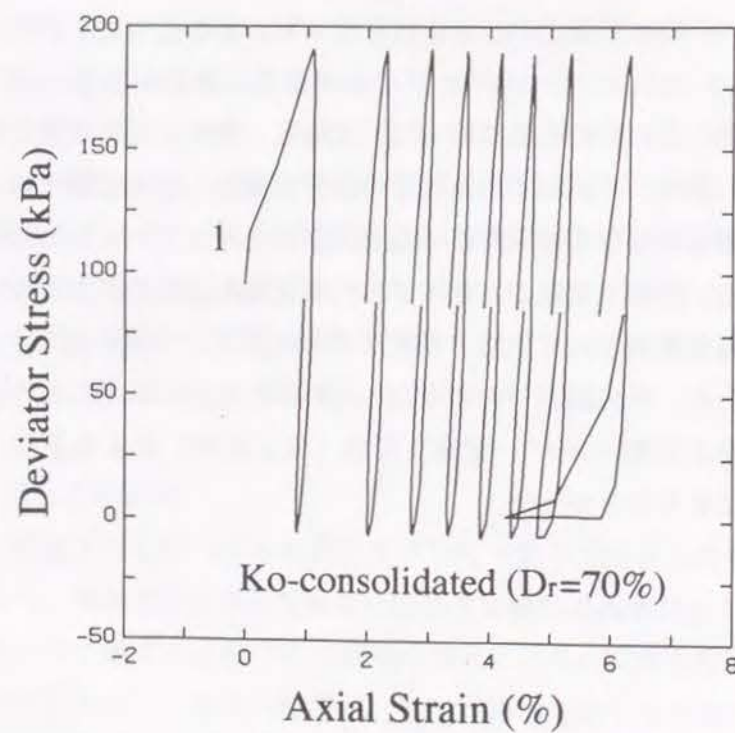


図 7-11 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

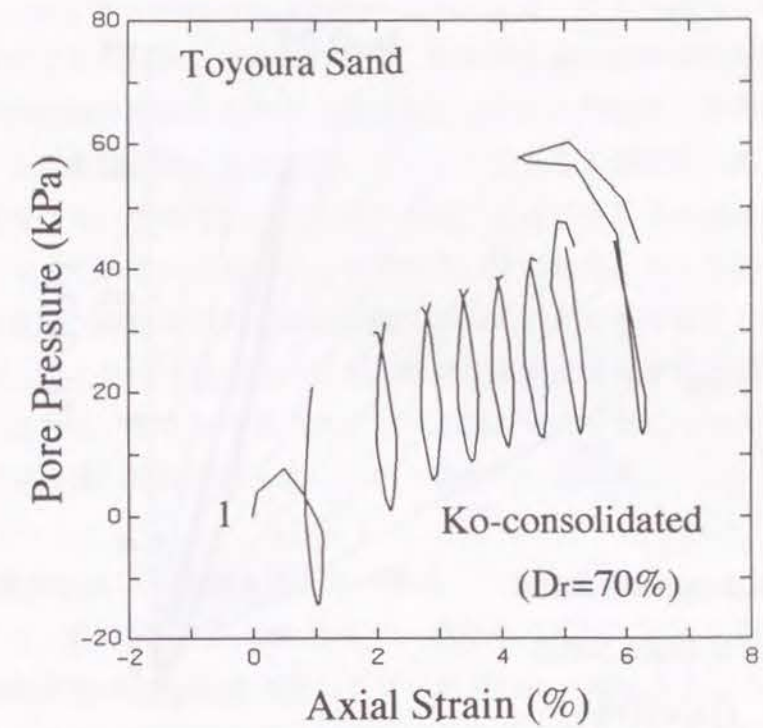


図 7-12 間隙水圧-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Pore Pressure Relationships)

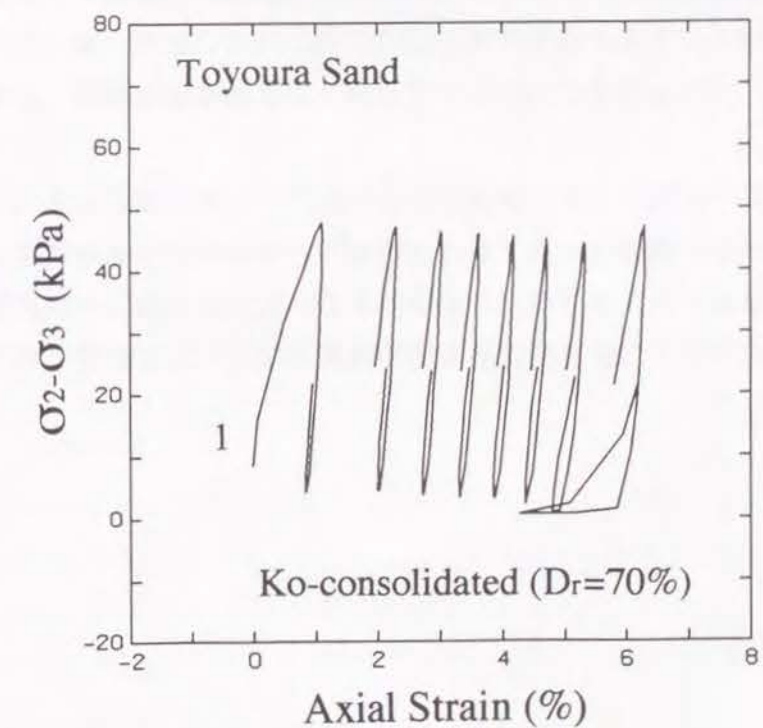


図 7-13 中間主応力-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Intermediate Principal Stress Relationships)

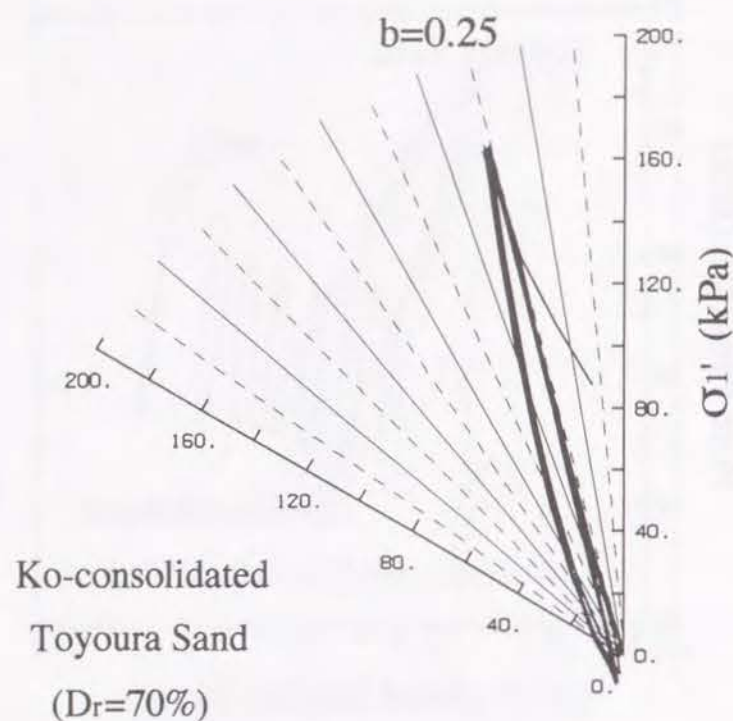


図 7-14 π 平面応力経路
(Stress Path on Octahedral Plane)

(7) 異方圧密履歴の違いと軸ひずみの発達状況

図 7-15 に、異なる 3 種類の異方圧密供試体による、非排水繰返し載荷時の軸ひずみの発達状況のグラフを示した。これらの図で、縦軸は各載荷回数時の軸ひずみの最大値と最小値を液状化時の軸ひずみの大きさ（最大値）で除した割合を、横軸は液状化（最終）載荷回数に対する各載荷回数の割合を表している。これらの図より、異方圧密履歴の違いによる明確な差異は見いだせない。あえて言えば、 K_o 圧密した供試体が最も軸ひずみの発達が最も遅くなっているとも見ることができる。すなわち、 K_o 圧密した供試体は初期段階での軸方向変形が最も少ない（軸方向剛性が高い）と判断することができる。このように考えた場合、第 5 章の 4 項で検討した、静的せん断に及ぼす圧密履歴の影響と関連が見えてくる。すなわち、第 5 章で得られた、せん断初期の部分については K_o （ K 一定）条件で圧密した供試体の剛性が最も高いという結論に一致する。

(8) 異方圧密履歴の違いと間隙水圧の発達状況

図 7-16 には、先の図 7-15 にならって、異なる 3 種類の異方圧密供試体による非排水繰返し載荷時の間隙水圧の発達状況のグラフを示した。縦軸は上述の発達割合を間隙水圧で置き換えたもので、横軸は全く同じ取り方をしている。これらの図より、載荷の初期段階での間隙水圧の発達割合を比較すると、わずかではあるが K_o 圧密した供試体が最も大きいのがわかる。この傾向についても、上述の軸ひずみの発達状況と同じく、第 5 章で得られた結論に大きく関連している。すなわち、第 5 章では砂の排水せん断を対象にしていたが、 K_o （ K 一定）圧密した供試体の体積圧縮性が最も大きいという結論は、非排水条件で考えた場合、間隙水圧が最も早く発現することにつながる。

このように、上述の軸ひずみの発達状況ともあわせて、供試体の異方圧密履歴の違いは非排水繰返し載荷挙動にも少なからず影響を及ぼすことが確認できた。すなわち、 K_o 圧密すると、軸方向への剛性は大きくなるが体積の圧縮性も大きくなるため、載荷の初期段階での軸ひずみの発達量は少ないが過剰間隙水圧の発生量は大きくなると考えられる。

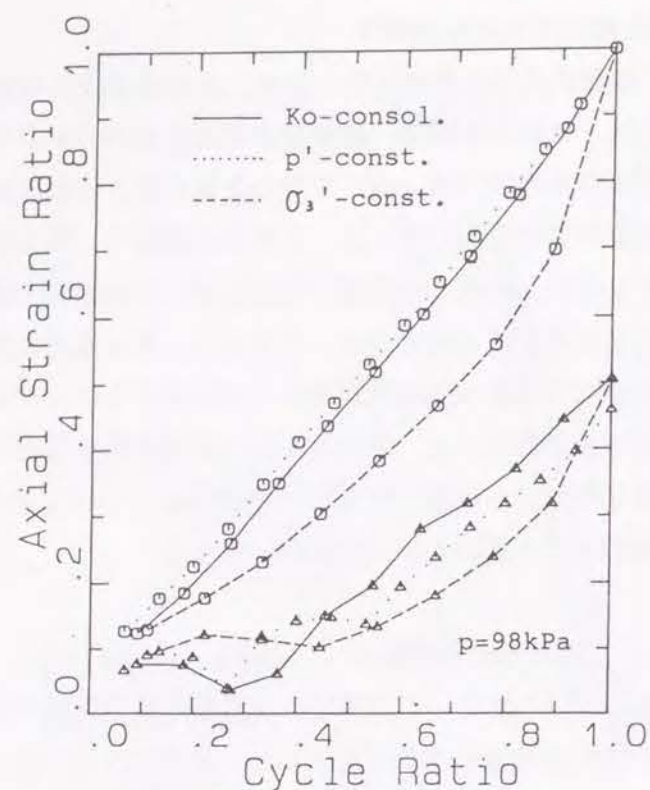


図 7-15 軸ひずみの発達状況
(Development of Axial Strain)

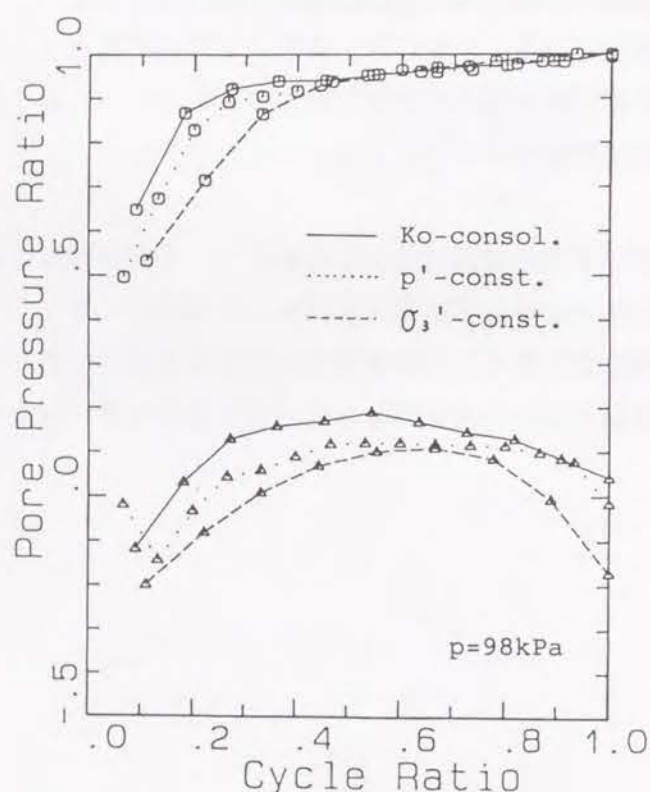


図 7-16 間隙水圧の発達状況
(Development of Pore Pressure)

7.3.3 異方圧密非排水繰返し载荷（軸圧・セル圧両振り）

ここでは、異方圧密された飽和豊浦砂の軸圧・セル圧両振りの非排水繰返し载荷挙動について、試験結果をもとに考察する。軸圧とセル圧の両方を振動させるのは、繰返し载荷時により積極的に供試体に偏差応力を载荷するためである。したがって、载荷時の軸圧とセル圧の周期は逆位相とし、载荷中の平均主応力を（全応力として）一定に保った。この両振り試験は、本来なら等方圧密した供試体に対して実施するのが繰返し载荷時の応力状態から考えても有効であると考えられるが、等方圧密状態からセル圧を増加させると供試体が ε_2 方向にも収縮を受けるため、拘束板が供試体から離れてしまう可能性が大きい。したがって、偏差応力が作用して側方への変形力が内在するような異方圧密条件でのみ試験を行った。供試体条件ならびに試験結果の一覧を表 7-03 に示したが、セル圧と軸圧とを逆位相で振動させた点以外は上述の異方圧密非排水繰返し载荷の場合と全く同じである。また、上述の結果で異方圧密履歴による顕著な差異はほとんどみられなかったため、ここではすべて K_o 圧密を行った。

表 7-03 試験条件・供試体条件の一覧（両振り試験）

圧密径路	相対密度 D_r (%)	拘束圧 σ_3' (kPa)	载荷応力比 $q_d/2\sigma_3'$	繰返し载荷回数 N_c
K_o	69.6	62.6	0.883	2.9
K_o	71.7	61.7	0.860	8.1
K_o	68.8	61.0	0.833	14.0
K_o	67.3	63.4	0.802	32
K_o	72.1	62.6	0.801	70

(1) 間隙水圧－载荷回数関係

図 7-17 に、間隙水圧と载荷回数割合（破壊時を 100とした時の割合）の関係を示した。この図より、セル圧を振動させない場合とは少々異なり、間隙水圧は繰返し载荷の進行とともにその大きさと振幅をわずかに増大させながら液状化に至っている点が注目される。また、軸圧载荷時にセル圧を逆位相で減少させているため、間隙水圧の値は負の側にも大きく振れており、その波形もかなり整っているのがわかる。これらは、偏差応力を積極的に与えたことによる効果であると考えられる。

(2) 軸ひずみ-載荷回数関係

図 7-18 には、軸ひずみと載荷回数割合（破壊時を 100とした時の割合）の関係を示した。この図を見ると、間隙水圧の場合とは異なり、セル圧を振動させない場合との差はほとんど見られない。しいて言えば、載荷の進行による残留ひずみの蓄積がやや少ない程度である。セル圧振動の影響があまり現れていないことについては、後述する応力-ひずみ関係の考察のところで併せて考察する。

(3) 応力径路の比較

図 7-19 には、軸圧・セル圧両振り試験（以下、両振り試験と略す）と通常のセル圧は一定で軸圧だけ振動させる試験（以下、片振り試験と略す）の応力径路を示した。ここで、縦軸は偏差応力（ $\sigma_1' - \sigma_3'$ ）で横軸は平均有効主応力（ $(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') / 3$ ）である。この図を見ると、軸圧・セル圧両振り試験の結果も、応力径路が載荷の始めから定常的なループを描いている点、圧縮側の応力径路が限界状態線に一致した時に液状化している点、応力径路のループが圧縮端よりも伸張端の方が大きく限界状態線側に移動している点、伸張端では軸差応力の反転が生じている点など、セル圧を振動させない場合とほとんど同じ応力径路を描いているのがわかる。さらに、他の試験結果も併せて調べた結果、セル圧を振動させた場合でも液状化には軸差応力の反転が不可欠であることもわかった。ここでは、より積極的に繰返しせん断応力を載荷する目的で軸圧・セル圧の両方を振動させたわけであるが、結果的には軸圧のみ振動させた場合と同じ繰返し載荷の効果を与えていたことになる。

(4) 応力-ひずみ関係の比較

図 7-20 には、両振り試験と片振り試験の応力-ひずみ関係を示した。ここで、縦軸は軸差応力（ $\sigma_1' - \sigma_3'$ ）である。この図を見ると、両振り試験の結果の方が液状化までの軸ひずみの発達量がかなり少ない点が注目される。この点を除けば、繰返し載荷時に描かれるヒステリシス・ループが小さい点、軸ひずみが圧縮側のみに発達している点、個々の載荷によって描かれるヒステリシス・ループの大きさがほとんど同じである点、軸ひずみは一定の割合で増大しながら破壊（液状化）に至っている点など、片振り試験とほぼ同じ特徴を示している。これらは、応力径路についての考察と同様に、軸圧・セル圧両振りにした場合でも結果的には軸圧のみ振動させた場合と同じ繰返し載荷の効果を与えていることを示していると考えられる。

(5) 間隙水圧-軸ひずみ関係

図 7-21 には、両振り試験と片振り試験の間隙水圧と軸ひずみの関係を示した。この図を見ると、両振り試験の結果は間隙水圧の振幅がかなり大きくなっているのがわかる。こ

れは、セル圧を振動させているためであり、見かけ上このような結果になるのはもっともなことである。しかし、この影響を差し引いて考えても（図 7-22 参照）、上述の軸ひずみ振幅量の違いの他に、負の間隙水圧が発生している点や間隙水圧が漸増しながら液状化に至っている点などが軸圧のみ振動させた場合とは異なっている。これらの違いは、両振り試験では軸圧載荷時にセル圧が減少するため、これに伴うダイレイタンスの発達が促進されるためであると考えられる。供試体の圧密条件を考えた場合、等方圧密よりも異方圧密した場合の方がダイレイタンスの影響が顕著に現れるが、軸圧とセル圧を逆位相で振動させることによりこの影響がさらに顕著になったものと考えられる。

(6) 中間主応力の比較

図 7-23 に、両振り試験と片振り試験における中間主応力の発達状態を比較するため、 π 平面での応力径路を示した。この図より、両振り試験でも片振り試験と同様に、載荷中の中間主応力係数 b 値がほぼ一定になっており、また、この時の b 値はほぼ 0.25 であることがわかる。しいて言えば、両振り試験の結果の方が b 値の変動がさらに小さくなっているが、これは、セル圧も振動させてより積極的に繰返し偏差応力を与えたことによると考えられる。これまでの片振り試験の結果から、異方圧密された供試体では繰返し載荷中の b 値がほぼ一定になり、かつ、その値が静的せん断試験の結果とも一致していることがわかっているが、この特性は両振り試験にもあてはまることが新たに確認された。中間主応力の挙動は、平面ひずみ条件にある土の挙動を考える上で極めて重要な因子であり、今回得られた結果の意義は大きいと考えられる。

(7) 液状化強度の比較

図 7-24 に、両振り試験と片振り試験における液状化強度を示した。この図で、縦軸は繰返し載荷応力比（ $\sigma_d / 2 p_0'$ ）で横軸は繰返し載荷回数（ N_c ）である。また、繰返し破壊の判断基準としては、上述の等方圧密非排水せん断の場合と同様に、ひずみ両振幅 DA が 2% になった場合とした。この図を見ると、液状化強度としては両振り試験の方が片振り試験の結果よりも約 4% 程度大きいことがわかる。これは、変形挙動のところでも指摘したように、両振り試験では軸圧載荷時にセル圧が減少するため、負の間隙水圧の発生によって有効拘束圧が増大することによるものと考えられる。しかし、より積極的に繰返し偏差応力を与えた結果とはいえ、実地盤においてこのような応力状態を想定するのは難しいこと、また、どちらの試験においても供試体が液状化破壊するためには軸差応力の反転が一つの重要な判断基準になることなどから考えて、両振り・片振りを問わず液状化強度としては片振り試験の結果の方を利用するのが妥当であろうと考えられる。

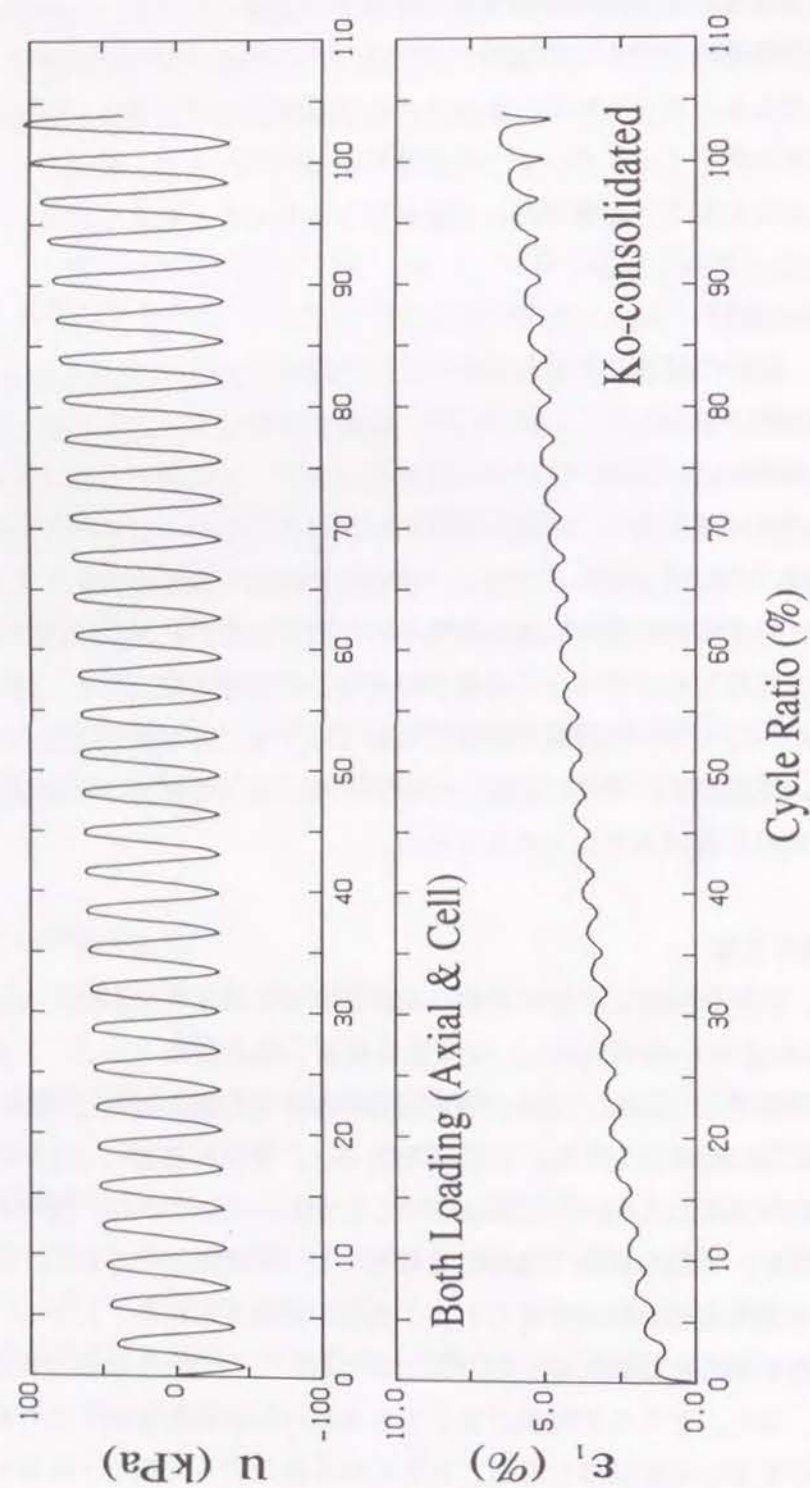


図 7-17 間隙水圧—載荷回数割合関係
(Cycle Ratio v. s. Pore Pressure)

図 7-18 軸ひずみ—載荷回数割合関係
(Cycle Ratio v. s. Axial Strain)

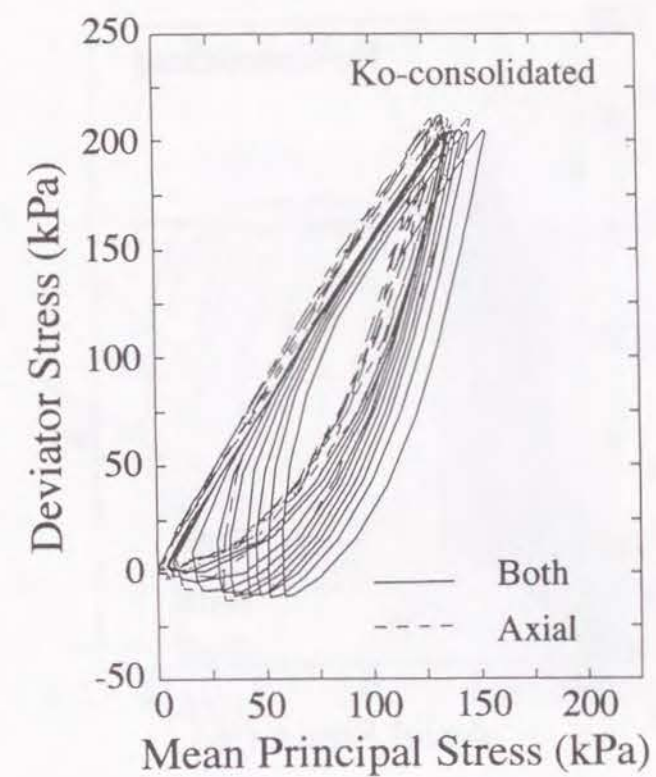


図 7-19 応力経路
(Stress Path)

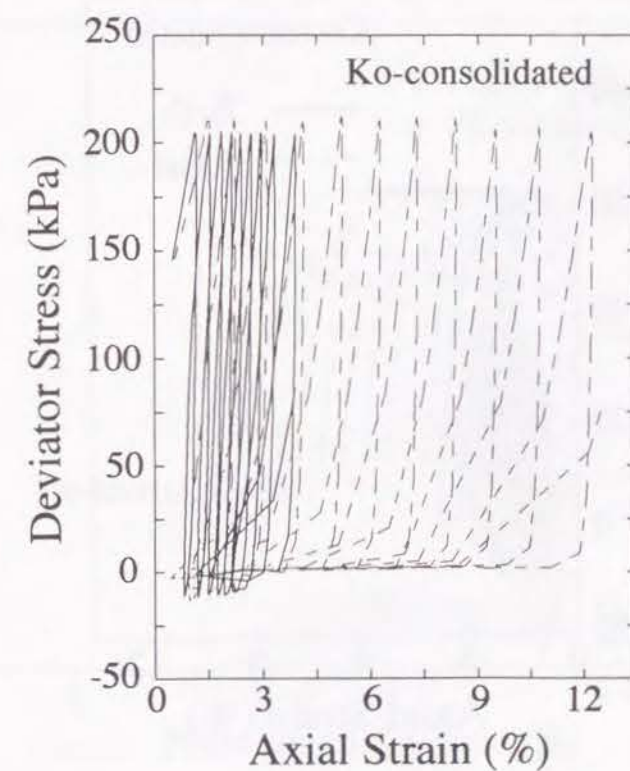


図 7-20 応力—ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

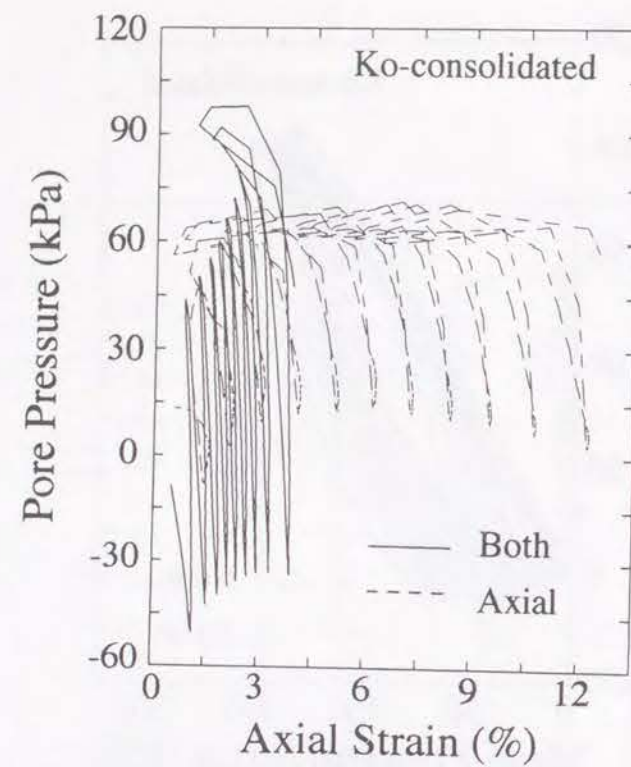


図 7-21 間隙水圧—軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Pore Pressure Relationships)

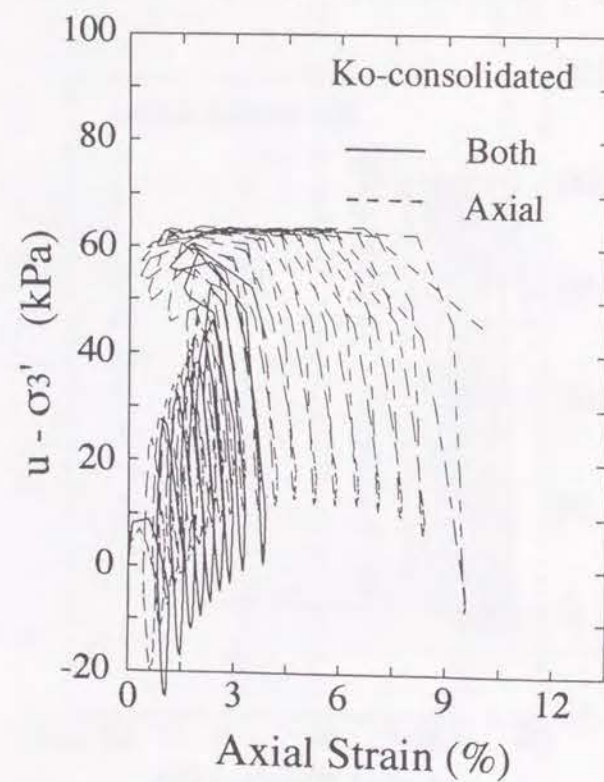


図 7-22 間隙水圧 (計算値) —軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Calculated Pore Pressure Relationships)

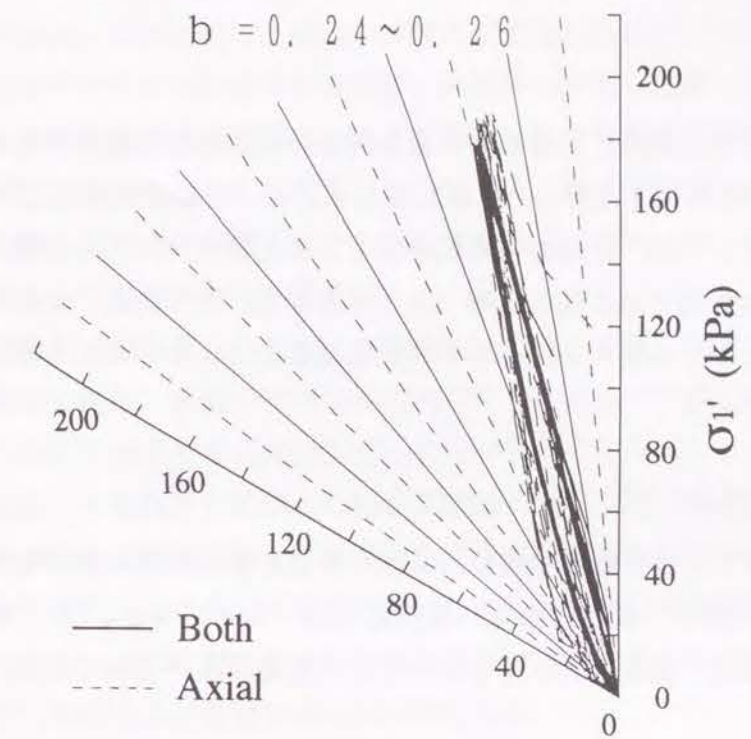


図 7-23 元平面応力径路
(Stress Path on Octahedral Plane)

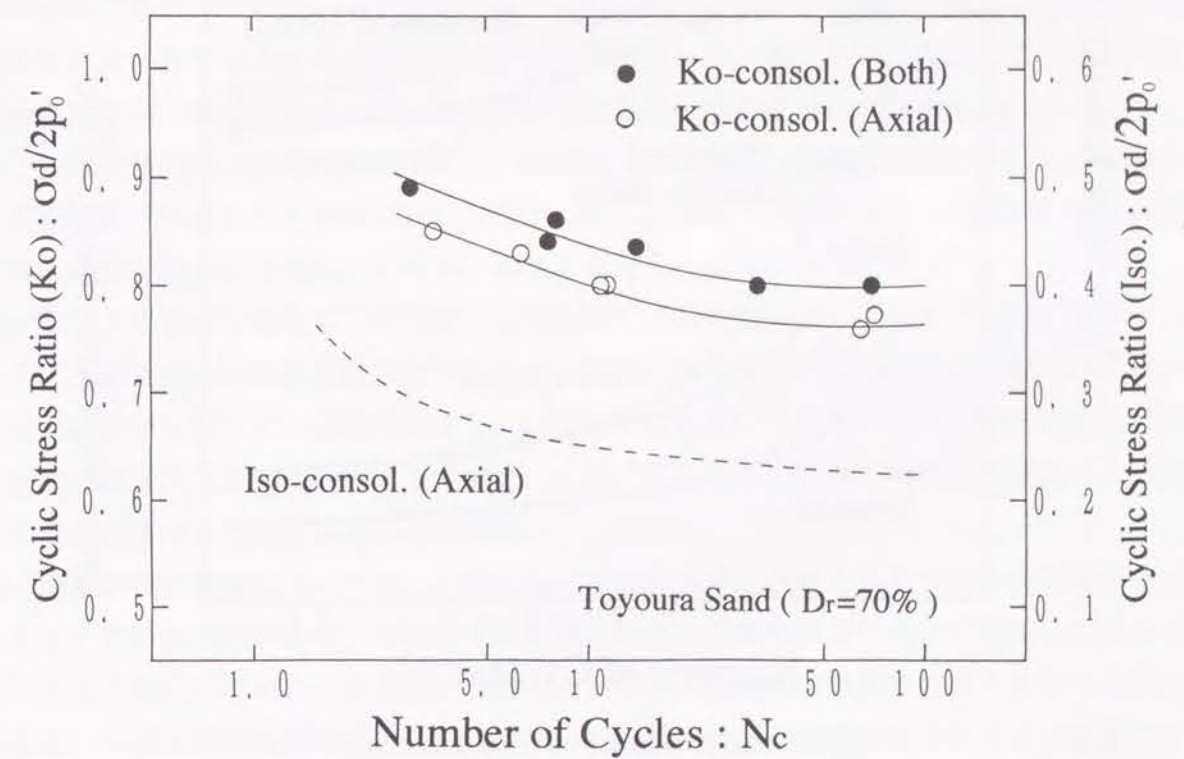


図 7-24 非排水繰返し载荷強度の比較
(Comparison of Undrained Cyclic Strength)

7.4 まとめ

本章では、平面ひずみ条件における砂の基本的な非排水繰返し载荷特性を調べ、これを目的として、種々の条件の下で行った試験結果をもとに、その力学特性について考察した。考慮した圧密条件としては、三軸の一斉試験などとの比較を目的とした等方圧密と、平面ひずみ条件として本来的である異方圧密（ K_0 圧密など）とがある。また、より積極的に偏差応力を作用させるために拘束圧を振動させる試験も行った。これらの試験を通して得られた結論を以下に示す。

(1) 液状化強度について

図 7-25 に、本章で行った飽和豊浦砂の非排水繰返し载荷試験の液状化強度をまとめたものを示した。この図で、縦軸は繰返し载荷応力比（ $\sigma_d / 2p_0'$ ）、横軸は繰返し载荷回数（ N_c ）、繰返し破壊の判断基準はひずみ両振幅 $DA = 2\%$ である。

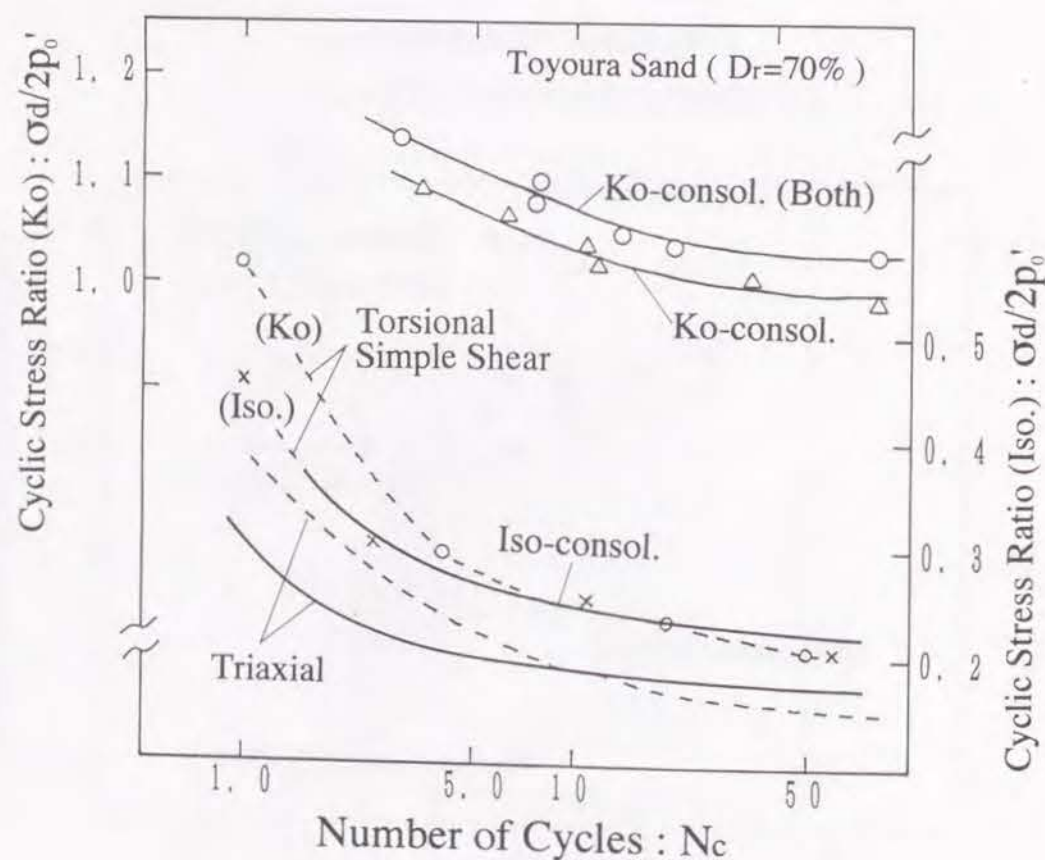


図 7-25 非排水繰返し载荷強度のまとめ
(Summary of Undrained Cyclic Strength)

この図より、以下のような結論が得られる。

- 等方圧密した場合と異方圧密した場合では液状化強度が根本的に異なっている。これは、等方圧密の方が文字どおり等方応力状態で供試体を繰返し圧縮・伸張する試験であるのに対して、異方圧密の方は初期せん断を受けた状態から軸方向の圧縮応力を増減させる試験であることによると考えられる。したがって、異方圧密の方は繰返し载荷中に軸差応力の反転が生じている時間の割合も極めて少なく、等方圧密の場合とは根本的に破壊モードが異なっているものと考えられる。
- 平面ひずみ試験と三軸試験との液状化強度の比較については、平面ひずみ強度の方が約 20 % 程度大きくなる。平面ひずみ試験では拘束棒によって文字どおり供試体の変形が拘束されるため、このような強度差となって現れたものと考えられる。
- 平面ひずみ試験と中空ねじり試験との液状化強度については、両者がほぼ一致している点が注目される。この理由としては、平面ひずみ試験・中空ねじり試験ともに、供試体が平面ひずみ状態にあるためと考えられる。しかし、平面ひずみ試験では軸方向への繰返し圧縮を行っているのに対して、中空ねじり試験では主応力軸の回転による繰返し単純せん断を行っている点に注意しなければならない。

(2) 平面ひずみ試験・三軸試験の違いについて

平面ひずみ試験と三軸試験における最も大きな違いは拘束棒の有無、すなわち、側方拘束の有無である。この違いによって平面ひずみ試験では供試体の剛性が増大し、変形・強度特性に次のような大きな差異を及ぼすことがわかった。強度特性に関しては上述の液状化強度についての項で考察したので、ここでは変形特性を中心にまとめる。

- 液状化後の応力振幅については、三軸試験ではその減少が著しいのに対して、平面ひずみ試験ではほとんど振幅が変化しなかった。これは、拘束棒によって液状化後も供試体の剛性がある程度保たれるためであると考えられる。
- 軸ひずみ振幅の挙動については、三軸試験では初期液状化に至るまで軸ひずみがほとんど発達せず、液状化後に急激に増大する傾向にあったが、平面ひずみ試験では载荷の初期段階から軸ひずみ振幅が発達し、供試体が液状化した後も軸ひずみ振幅はそれほど急激には増大しない点が大きく異なっていた。これらの違いも、拘束棒の有無による側方拘束の違いに起因すると考えられる。
- 間隙水圧の挙動については、三軸試験では液状化後比較的すみやかにその振幅が小さくなっているのに対して、平面ひずみ試験では液状化後もかなり大きく発達している点が大きく異なっていた。この違いについても、やはり拘束棒の有無に起因すると考えられるが、平面ひずみ条件では側方拘束によって液状化後も供試体の剛性がある程度維持され、除荷時に有効拘束圧を保ちながら（すなわち間隙水圧の振幅を維持しながら）軸ひずみの急激な増大を抑制するものと考えられる。

(3) 等方圧密・異方圧密の違いについて

液状化強度のところでも述べたように、等方圧密した場合と異方圧密した場合では基本的に載荷条件が異なっており、破壊モードも異なるため、両者は変形特性も大きく異なっている。この違いは、載荷時の応力経路にも明確に現れているが、変形特性に及ぼす影響としては以下のような点が挙げられる。

- (a) 応力経路に関しては、異方圧密した供試体では載荷の始めから圧縮側が限界状態線に沿うようなループを描きわずかに限界状態線に近づくもののほとんど定常的なループを描いているのに対して、等方圧密した供試体では応力経路は平均有効主応力軸に沿って徐々に原点側に近づきながらやがて限界状態線に沿ったループ（8の字型の）を描いている。この原因は、上述のように、両者は基本的に試験条件が異なっているためと考えられるが、その一方で、圧密終了時の応力状態から平均有効主応力が減少する方向に応力経路が移動しているという点では同様の挙動であるとも考えられる。なお、これらの試験で、非排水繰返し載荷で見られる限界状態線は、静的せん断試験で得られたものと一致していた。
- (b) 軸ひずみの挙動については、異方圧密した供試体では載荷中の軸ひずみは圧縮側にのみ発達してそのまま圧縮破壊するのに対して、等方圧密した供試体では載荷方式の影響でいくぶん伸張側に軸ひずみが偏るものの残留ひずみはほとんど生じていない。これは、異方圧密した供試体では常に初期せん断力が軸圧方向に作用しているため、繰返し載荷の進行に伴う過剰間隙水圧の上昇によって軸ひずみは非排水クリープのような圧縮挙動を示したものと考えられる。
- (c) 間隙水圧の挙動については、軸圧載荷時に発生する間隙水圧の正負が全く異なっている。すなわち、異方圧密した供試体では最初の1サイクルを除くと圧縮時に間隙水圧が減少しているが、等方圧密した供試体では圧縮時に間隙水圧が増加している。この原因としては、土粒子構造の異方性に起因するダイレイタンスの影響が考えられる。つまり、異方圧密されると供試体内の土粒子の噛み合わせが密になり、圧縮応力が加わった時に体積の圧縮よりもダイレイタンスによる体積膨張の方が顕著に現れるものと考えられる。
- (d) 中間主応力の挙動については、等方圧密した供試体ではほとんどその効果が見られなかったのに対して、異方圧密した供試体では繰返し載荷の初期段階から中間主応力係数がほぼ一定の値になるという事実が明らかになった。さらに、この値は、静的せん断試験によって得られる b 値にほぼ等しく、平面ひずみ条件にある土の挙動を考えていく上で重要な発見であると考えている。中間主応力は平面ひずみ試験特有のものであるが、等方圧密は平面ひずみ条件として本来的でなく、また、繰返し載荷時の応力レベルも静的せん断に比べるとかなり小さかったため、等方圧密した場合にはその効果が現れにくかったものと考えられる。ただし、中間主応力の大きさとしてはほとんど現れていない

が、液状化時の軸ひずみ振幅が小さくなるなど、等方圧密の場合もその効果は無視できないものと考えられる。

(4) 軸圧・セル圧両振りの効果について

本研究では、より積極的に供試体に繰返し偏差応力を加える目的で軸圧・セル圧両振り試験を行った結果、片振り試験とは異なり間隙水圧が負の値にまで振れること、液状化強度も片振り試験と比べると4%程度大きくなることなどがわかった。これらは、セル圧を軸圧とは逆位相で振動させた効果であると考えられる。しかし、繰返し載荷時の応力状態を考えると、繰返し載荷の効果として基本的には片振りの場合と大差はないため、全般的には片振り試験と同様の傾向が得られたものと考えている。

(5) 液状化試験としての考え方について

いわゆる液状化試験としての必要条件是、非排水条件で供試体に繰返しせん断応力が載荷されることである。この条件を単純化して要素試験として具体化すると、等方圧密非排水繰返し単純せん断試験が最も適していると考えられる。一般的によく行われる液状化試験としての非排水繰返し三軸試験（等方圧密を初期条件とするもの）は、繰返しせん断応力が作用する面が水平面と45度の角度をなしている点を除けばほぼこの条件を満足している。平面ひずみ試験においても、初期条件を等方圧密として非排水繰返し載荷を行った場合、 ϵ_v 方向のひずみが拘束されているため三軸試験に比べてより単純せん断に近い拘束条件を満たすことになる。したがって、繰返し載荷における主応力軸の回転は再現できないものの、平面ひずみ試験で得られる液状化強度の結果が中空ねじりなどの繰返し単純せん断試験の結果にほぼ一致するのは理論的にも妥当であると考えられる。この意味で、非排水繰返し平面ひずみ試験を等方圧密条件で行う意義は非常に大きく、三軸試験を用いた液状化試験よりも応力・変形条件（拘束条件）としてより本質的である。一方、初期せん断を受けた（すなわち異方圧密条件で行う）非排水繰返し載荷試験は、上述した意味としての液状化試験とは少し応力・変形条件が異なることに注意しなければならない。すなわち、異方圧密によって載荷されている初期せん断力は鉛直方向であり、繰返しせん断力がかかるのは水平面とは45度の角度をなす面になっている点である。したがって、より本質的には、異方圧密試料を用いた中空ねじり試験などによって液状化強度を求める必要があり、平面ひずみ試験では主応力軸が回転できないという制約があることを認識しておかなければならない。とは言うものの、平面ひずみ試験は、中空ねじり試験に比べると用いる装置や試験方法がかなり簡単であるため、試験上の制約や条件などを十分に考慮して試験を行えば、その利用価値は非常に高いと考えている。

第8章 粘土の非排水繰返し平面ひずみ挙動

8.1 概説

ここでは、構築した平面ひずみ試験システムを用いて行った粘土の非排水繰返し載荷試験の結果をもとに、その力学特性について考察する。試験に用いた試料は市販のカオリン粘土で、試料の物理特性や供試体の作製方法については第4章で述べたとおりである。供試体は平面ひずみ条件であることを考えて基本的にはすべて K_o 圧密を行っており、圧密の方法などは静的せん断の場合と全く同様（第6章参照）である。また、比較のために三軸状態での試験も行っているが、供試体形状の違いによる影響を避けるために拘束棒を取り付けない点を除けば平面ひずみ試験と同じ方法・手順に従った。なお、液状化試験と同様の観点に立てば、等方圧密状態からの非排水繰返し載荷も行うべきであるが、粘土では砂などのように負圧による圧密が不可能であり、等方圧密によって拘束板が供試体から離れてしまう状況を防げないため、異方圧密（ K_o 圧密）状態のみを対象とした。

8.2 試験方法

粘土の非排水繰返し載荷試験の方法についても、基本的には地盤工学会の「土の繰返し非排水三軸試験」（「土質試験の方法と解説、第7編 第10章」（1990）参照）の基準に従い、試験方法はほぼ第7章で述べた砂の場合と同様にした。したがって、繰返し載荷の制御の精度や許容範囲などは前述の「飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験」（1988）の範囲内であり、砂の試験方法との主な違いは、繰返し載荷周期を砂の場合の10倍の100秒にした点のみである。繰返し載荷の基準などについては第7章の砂の非排水繰返し平面ひずみ挙動の項を参照されたい。以下、試験方法・手順について、詳細を説明する。

(1) 供試体の設置・圧密までの手順

供試体の設置までの手順については、基本的に、静的せん断の場合と同じである。詳細については第6章で述べたとおりであるが、非排水繰返し載荷試験は、静的せん断試験に比べると供試体の乱れが試験結果におよぼす影響が大きいため、砂の場合のように供試体

の応力条件の乱れには特に注意を払った。一方、供試体の飽和化についても静的せん断の場合と同じ Ampadu *et al.* (1989) の二重負圧法によった。供試体飽和後も供試体の体積分以上の脱気水を微小差圧のもとで通水して残留する気泡を除去し、さらに背圧 198kPa を載荷して一晩放置することにより、完全飽和をめざした。飽和状態の確認も砂の供試体と同様に非排水状態でセル圧を減少→回復する方法（第2回三軸試験実技講習会報告 (1983) 参照）で行い、Skempton の間隙水圧係数 B 値 ≥ 0.96 をもって完全飽和とみなした。

(2) 圧密の手順

圧密の手順も基本的には静的せん断の場合と同じである。すなわち、初期状態（ $\sigma'_3 = 19.6\text{kPa}$ ；等方）から平均有効主応力一定の排水径路で目的とする応力比にした後、 K_o 条件を保ちながら軸圧とセル圧を調整した。圧密終了時の体積ひずみや側方ひずみの変動値の基準もすべて静的せん断の場合と同じであり、軸圧の増加速度は約 0.03kPa/min で側方ひずみの変動許容範囲は $\pm 0.005\%$ 以内とし、体積ひずみの変化速度が $10^{-4}\%/min$ 以下になった段階で一次圧密の終了とした。また、静的せん断の場合と同様に、過圧密比の影響についても調べるため、 K_o 状態を保持したまま膨潤（除荷）させる過程も加えた。圧密径路の概略を図 8-01 に示す。

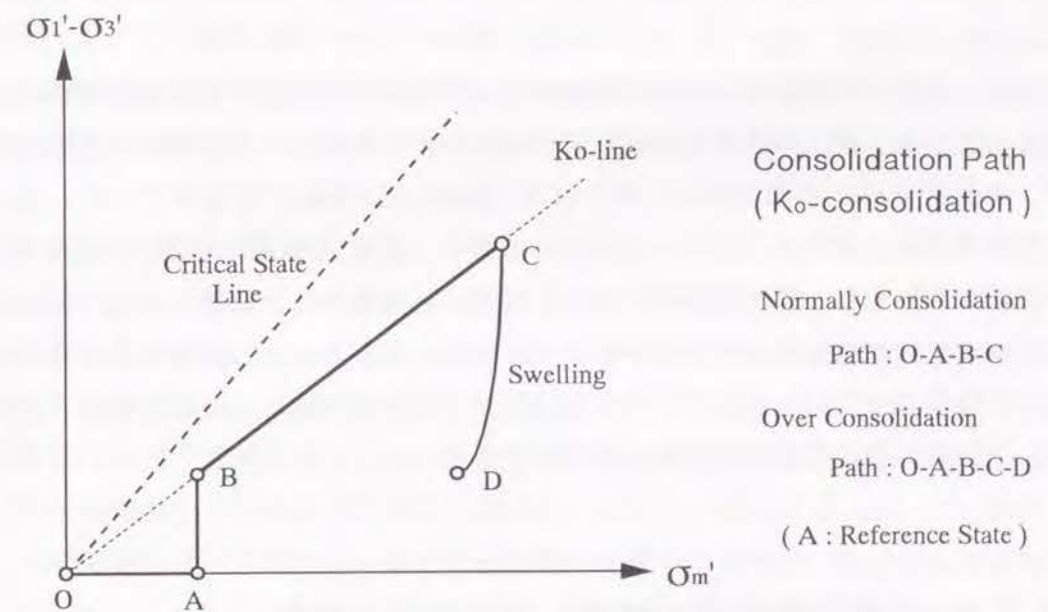


図 8-01 圧密径路
(Consolidation Path)

(3) 非排水繰返し載荷の手順

非排水繰返し載荷は、砂の場合と同様に基本的には上述の一斉試験の要領に準拠して行った。すなわち、繰返し載荷波形は圧縮側から始まる正弦波で、波形の乱れの許容範囲も

砂の場合と同じにした。したがって、砂の場合と異なっている点は繰返し載荷周期を 10 秒→100秒 (0.01Hz) としたことのみである。

ここで、載荷周期についていくらか考察を加える。一般に、粘土の力学特性は、変位や荷重の載荷速度による影響を大きく受ける。これは静的せん断試験にもあてはまり、供試体内部に過剰な間隙水圧の偏りが生じない程度のせん断速度が一つの基準となっている (例えば、土質試験の方法と解説 (1990), 第 7 編 第 5 章参照)。非排水繰返し載荷試験においてもこの条件は重要であり、発生する過剰間隙水圧に偏りを生じさせないためには繰返し載荷の周期は長い方がよい。本研究では、山本ら (1992) の報告をもとに、砂の載荷周期の10倍である 100秒を粘土の繰返し載荷周期とした。

なお、載荷制御は砂の場合と同様に荷重制御モードにある軸圧サーボへの D/A 出力によって行っているが、1 周期あたり1000点のサンプリングを行って供試体の応力状態を逐次計算しながら 100点の D/A 出力によって応力制御による正弦波を与え、データのサンプリングも各 D/A の出力直前の 1 周期あたり 100点計測している。

8.3 粘土の非排水繰返し載荷挙動

ここでは、平面ひずみ条件における粘土の基本的な非排水繰返し載荷特性を調べることを目的としている。粘土の非排水繰返し載荷挙動を考える場合、載荷周期が重要な問題となるが、本研究では上述のように 1 サイクル 100秒 (0.01Hz) を基準とした。また、考慮した圧密条件は上述のように K_0 圧密のみであり、正規圧密・過圧密の両条件において結果を比較した。なお、静的せん断の場合と同様に三軸条件との比較も行っているが、供試体の形状や試験方法などはすべて平面ひずみ試験と同じものとし、拘束棒を取り付けない点のみが異なるようにした。この条件では完全な軸対称状態にはならないが、供試体形状の違いが結果に及ぼす影響を危惧したためである。

8.3.1 K_0 正規圧密非排水繰返し平面ひずみ挙動

ここでは、 K_0 正規圧密された飽和カオリン粘土の非排水繰返し平面ひずみ挙動について、その変形特性を中心に考察する。試験条件ならびに試験結果の一覧を表 8-01 に示したが、非排水繰返し破壊の基準はひずみ両振幅が 5% になった時とし、その時の載荷回数と中間主応力係数の値も示した。

表 8-01 供試体条件・試験結果の一覧 (正規圧密)

初期間隙比 e_0	拘束圧 σ_{30}' (kPa)	載荷応力比 q_d / σ_{30}'	載荷回数 N_c	中間主応力 係数: b 値
1.264	112.3	0.183	53	0.290
1.282	116.0	0.236	11	0.229
1.276	118.5	0.205	23	0.276

(1) 間隙水圧－載荷回数関係

図 8-02 に、破壊までの載荷回数の異なる供試体について、間隙水圧の発達状況を示した。ここで、横軸には載荷回数割合 (供試体の破壊時を 100とした時の載荷割合) をとり、破壊までの載荷回数が異なっても比較しやすいようにした。この図を見ると、間隙水圧は振幅一定のまま載荷回数にほぼ比例しながら増大し、軸ひずみが大きく増大するあたりで最大値に収束する傾向が見られる。この傾向は砂 (第 7 章参照、繰返し載荷のかかなり早い段階で間隙水圧が最大値近くまで達する) とは大きく異なる点である。また、間隙水圧の発達状況をさらに細かく見ると、その増加傾向が載荷回数に対してやや上に凸になる傾向が見られ、この点に関しても砂の挙動と類似している。なお、間隙水圧の最大値は拘束圧の 40% 程度しか発現していないが、これは供試体が異方圧密されたものであるため、その大きさは圧密終了時の平均有効主応力と破壊直線との差にほぼ一致している。

(2) 軸ひずみ－載荷回数関係

図 8-03 には、軸ひずみと載荷回数割合 (上述) の関係を示した。軸ひずみの挙動は間隙水圧に大きく影響されると考えられるが、どちらの試験も載荷回数が増えると軸ひずみの大きさはその振幅とともに漸増し、いわゆるクリープ破壊に似た様相を示してはいるが、破壊直前で軸ひずみが激増している点が注目される。この傾向は破壊までの載荷回数にはほとんど無関係で、本研究で実施した試験すべてにあてはまっている。この特性については、三軸試験や過圧密粘土の平面ひずみ試験の結果もあわせて、後で詳しく検討する。

(3) 応力径路

図 8-04 にはこの試験での応力径路を示した。ここで、縦軸は軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$) で横軸は平均有効主応力 ($(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') / 3$)、付記した数字は載荷回数である。この図を見ると、応力径路は各サイクルでのループの傾きや形状はそのまま載荷の進行と共に平均有効主応力が減少する方向へ移動しており、砂の場合と比較すると根本的に載荷の機構や破壊を引き起こす要因が異なっているのがわかる。また、応力径路のルー

ブは破壊線に達したところで止まっており、この破壊線は静的せん断試験で得られるものと一致していた。このことは、繰返し载荷においても静的せん断パラメータが適用できる可能性を示していると考えられるが、過圧密粘土の結果なども参考にさらに検討したい。

(4) 応力-ひずみ関係

図 8-05 には応力-ひずみ関係を示した。ここで、縦軸は軸差応力 ($\sigma_1' - \sigma_3'$) であり、付記した数字は繰返し载荷回数である。この図を見ると、軸ひずみが増大するのは軸圧が载荷されている過程であり、除荷時にはほとんど軸ひずみ変動していないことがわかる。これは、供試体が K_0 圧密されて初期せん断を受けているためであり、また、試料が圧縮時にのみ降伏による塑性変形が進行していることを表していると考えられる。なお、この図ではほぼ同じ载荷間隔で各サイクルをプロットしているが、先の軸ひずみ-载荷回数関係でも見られたように、载荷回数が増えるとそれに伴って圧縮時の軸ひずみの増加率も増大するいわゆるクリープ的な破壊様相がここでも確認できる。

(5) 間隙水圧-軸ひずみ関係

図 8-06 に、間隙水圧と軸ひずみの関係を示した（付記した数字は繰返し载荷回数）。この図より、間隙水圧は繰返し载荷中その振幅はほぼ一定であるが、最初はほとんど軸ひずみの発達を伴わずに増大し、ある程度間隙水圧が増大すると徐々に軸ひずみも増大し始めているのがわかる。このことは、ここでの非排水繰返し破壊が、繰返し载荷による過剰間隙水圧の蓄積に起因していることを示すものと考えられるが、砂のように軸差応力の反転が原因ではない点に注意する必要がある。また、軸圧载荷時に間隙水圧が増大している点も砂の場合とは異なっており、粘土の場合にはダイレイタンスによる体積膨張が砂ほど顕著でないことがわかる。

(6) 中間主応力-軸ひずみ関係

図 8-07 には中間主応力と軸ひずみの関係を示した。ここで、縦軸は中間主応力 ($\sigma_2' - \sigma_3'$) である。この図を見ると、中間主応力は、軸ひずみ量にほぼ比例するように、それ自身の大きさ・振幅ともに増大しているのがわかる。この挙動は砂の場合とは大きく異なる点であり、異方圧密粘土では中間主応力の発現が軸ひずみ（非排水条件であるためせん断ひずみに置き換えることもできる）に大きく依存することを示していると考えられる。このことを次の図 8-08 の π 平面での応力経路で見ると、やはり、中間主応力係数 b 値 ($= (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$) の値も繰返し载荷の進行とともに増大しており、砂とはその特性が完全に異なっているのが確認できる。しかし、破壊時の b 値については粘土の場合も 0.30 程度であり、静的せん断での値とほぼ一致している点は注目すべき結果であると考えている。

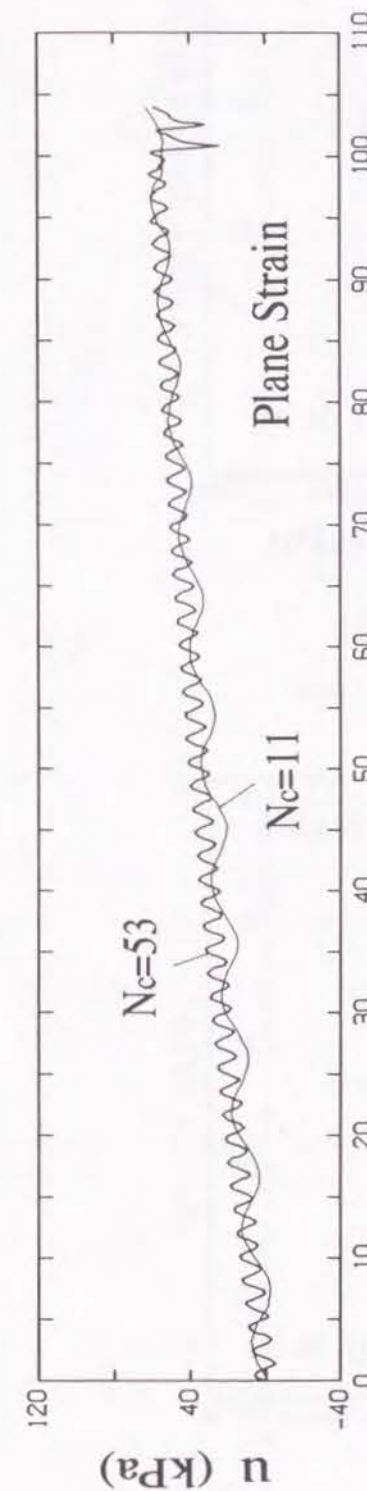


図 8-02 間隙水圧-载荷回数割合
(Cycle Ratio v. s. Pore Pressure)

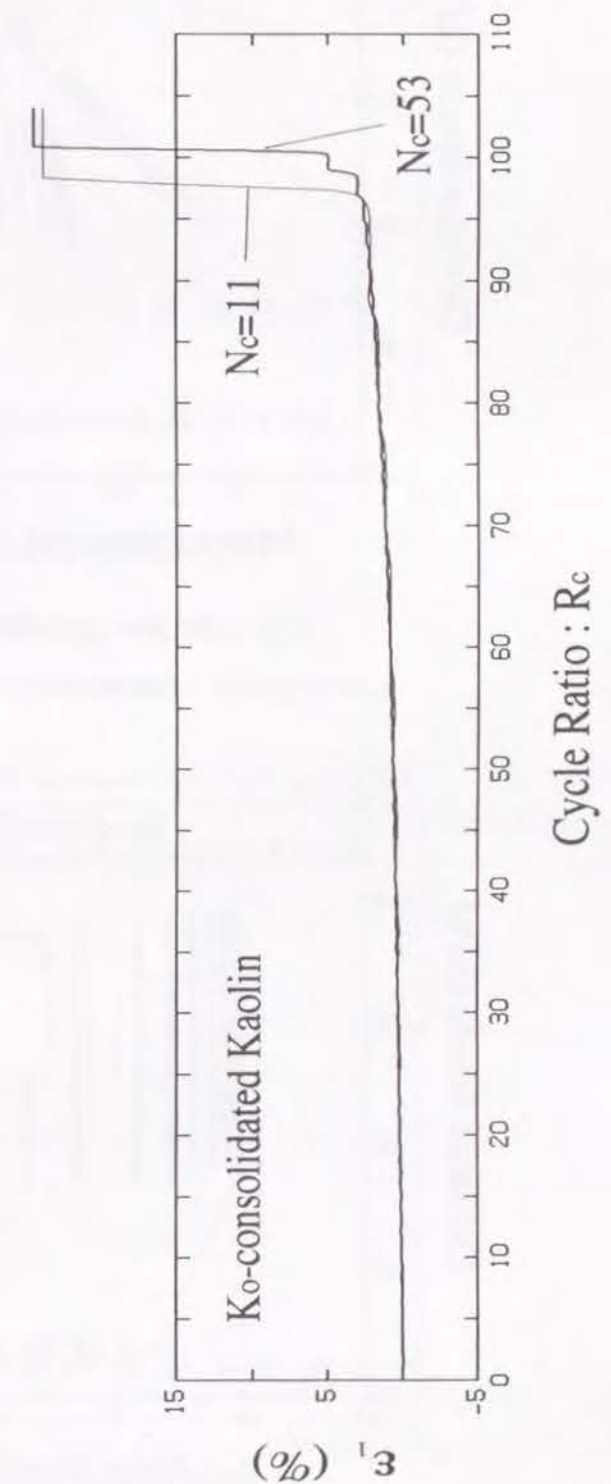


図 8-03 軸ひずみ-载荷回数割合
(Cycle Ratio v. s. Axial Strain)

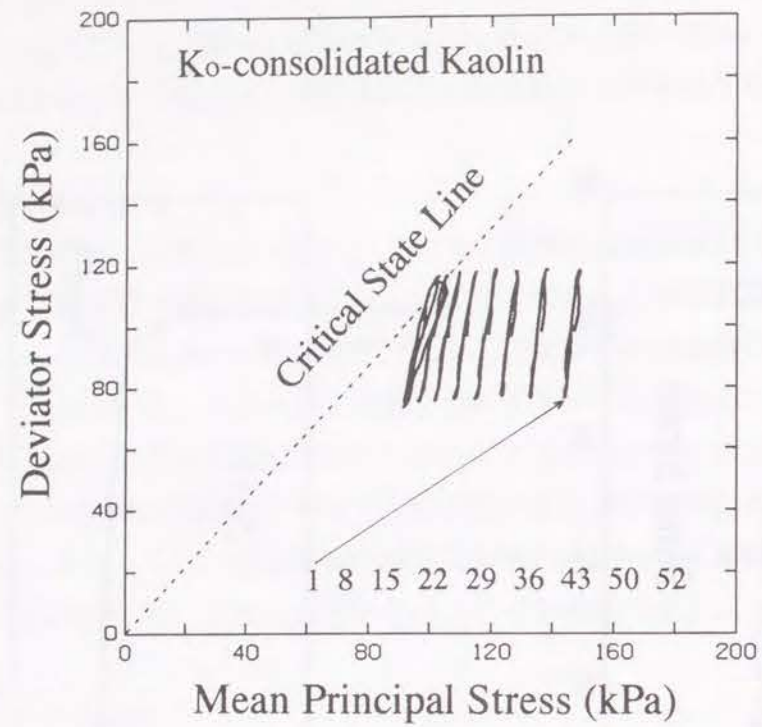


図 8-04 応力径路
(Stress Path)

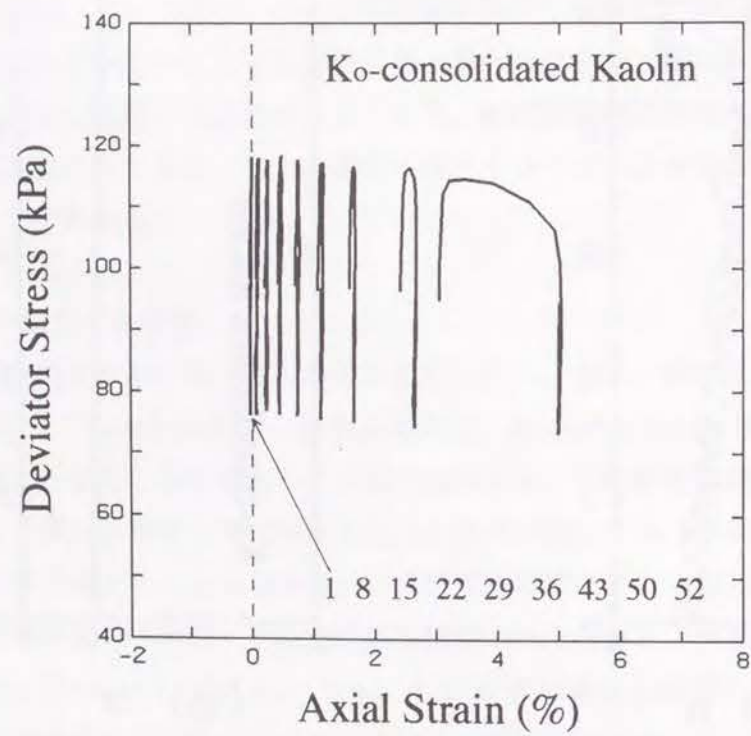


図 8-05 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

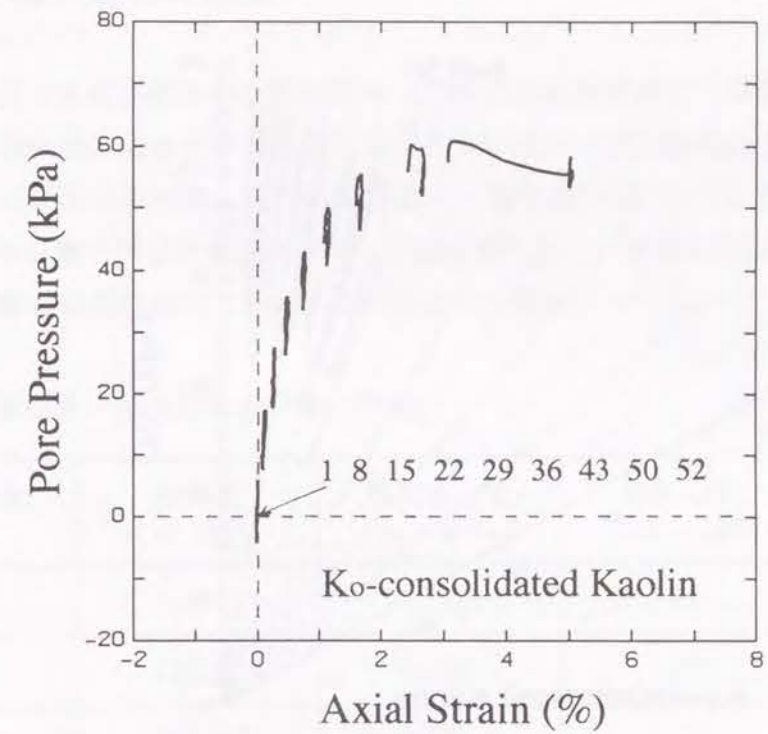


図 8-06 間隙水圧-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Pore Pressure Relationships)

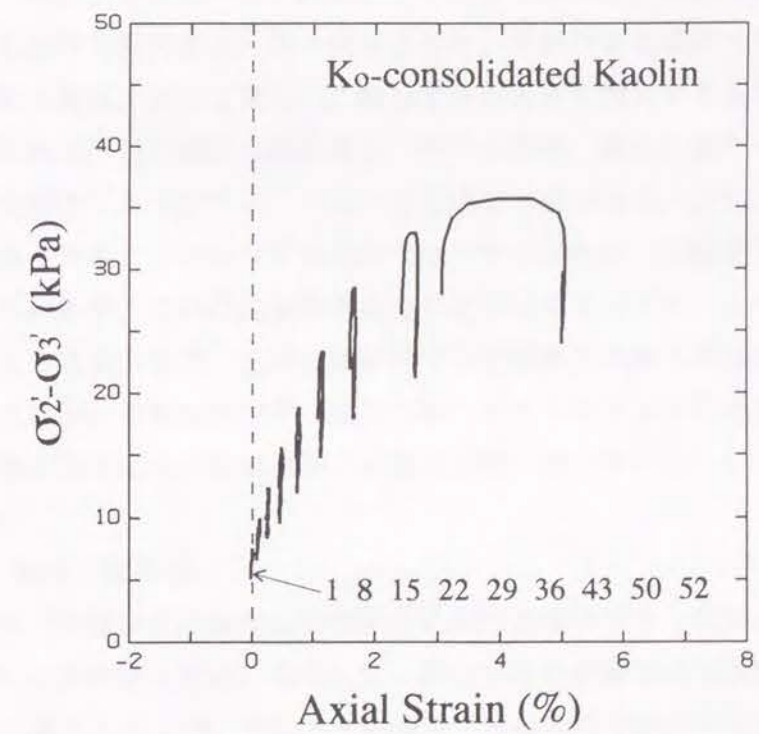


図 8-07 中間主応力-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Intermediate Principal Stress Relationships)

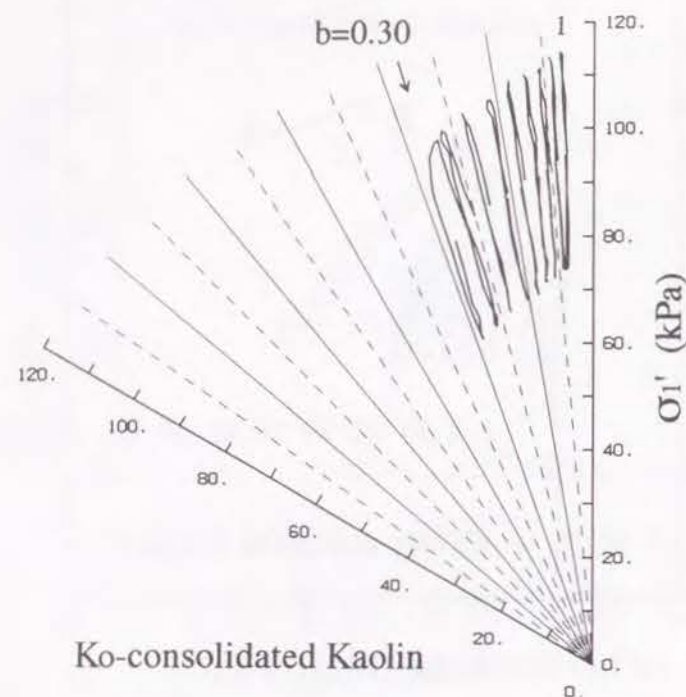


図 8-08 π 平面応力経路
(Stress Path on Octahedral Plane)

8.3.2 三軸挙動との比較

ここでは、 K_o 正規圧密された飽和カオリン粘土の非排水繰返し平面ひずみ試験の結果について、三軸試験による結果と比較しながらその変形・強度特性について考察する。三軸試験に用いた供試体条件ならびに試験結果の一覧を表 8-02 に示したが、これらの供試体も平面ひずみ試験と同じ予備圧密ブロックから切り出し、整形されたものである。なお、平面ひずみ試験の結果は前項で示したものを引用して検討している。

表 8-02 供試体条件・試験結果の一覧 (三軸)

初期間隙比 e_0	拘束圧 σ_{30}' (kPa)	載荷応力比 q_d / σ_{30}'	載荷回数 DA = 5(%)	載荷回数 DA = 10(%)
1.275	110.7	0.175	24	31
1.292	116.0	0.164	51	54
1.259	114.9	0.221	9	10

(1) 間隙水圧－載荷回数関係

図 8-09 に、平面ひずみ条件と三軸条件における間隙水圧と載荷回数割合（供試体の破壊時を 100とした時の載荷割合）の一例を示した。平面ひずみ条件・三軸条件とも、間隙水圧は載荷回数にほぼ比例して漸増し、軸ひずみが大きく増大するあたりで最大値に収束する傾向が見られる。この傾向は砂の場合（第 7 章参照、繰返し載荷のかなり早い段階で間隙水圧が最大値近くまで達する）とは大きく異なる点である。また、間隙水圧の発達状況をさらに細かく見ると、平面ひずみ条件ではやや上に凸に、三軸条件ではやや下に凸になる傾向が見られるが、これは試験条件の違いによるダイレイタンス特性の違いに起因するものと考えられる。なお、正規圧密試料では間隙水圧の最大値は拘束圧の 40% 程度しか発現していないが、これは供試体が異方圧密されたものであるためで、その大きさは圧密終了時の平均有効主応力と破壊直線との差にほぼ一致している。

(2) 軸ひずみ－載荷回数関係

図 8-10 には、平面ひずみ条件と三軸条件における軸ひずみと載荷回数割合（上述）の一例（図 8-09 の供試体に対応）を示した。軸ひずみの挙動は間隙水圧の発達状況に大きく影響されると考えられるが、平面ひずみ条件と三軸条件で認められる軸ひずみ挙動の違いはさらに顕著である。どちらの試験も、載荷回数が増えると軸ひずみの大きさはその振

幅とともに漸増し、いわゆるクリープ破壊的な様相を示しているが、破壊直前での軸ひずみの発達状況はかなり異なっている。すなわち平面ひずみ条件では供試体が破壊する数サイクル前から急激に軸ひずみが増大しており、この傾向は破壊までの載荷回数にはほとんど無関係である。なお、破壊後の供試体の形状を比較すると、軸対称三軸条件では全体的に圧縮されているのに対して、平面ひずみ条件では2本のせん断面が交わるように発生する傾向にあった。

(3) 非排水繰返し載荷強度

図 8-11 には、平面ひずみ条件と三軸条件における非排水繰返し強度の差を示した。この図で、縦軸は繰返し載荷応力比： q_d / σ_{30} （ q_d は繰返し載荷応力片振幅、 σ_{30} は初期有効拘束圧）であるが、排水繰返し強度はやはり平面ひずみ条件の方が大きく、砂質土の結果とも一致している。すなわち、平面ひずみ条件では拘束棒によって側方変形が抑制されるため、剛性の増大とともに繰返し強度も大きくなると考えられる。なお、異方圧密カオリンの場合、両者の強度差は約10%であった。

(4) 変形特性に関する考察

平面ひずみ条件と三軸条件における変形・強度特性の違いは、主に供試体の拘束条件の違い（拘束棒の有無）に起因していると考えられる。すなわち、拘束棒は供試体の側方への変形自由度を低くして供試体の剛性を高めるとともに、ダイレイタンスの発達を抑える働きもすると考えられる。平面ひずみ条件で載荷の初期から間隙水圧がある程度発現しているのはこのためであり、拘束棒によるダイレイタンス（体積膨張）の抑制効果が大きく影響していると考えられる。また、軸ひずみの挙動は拘束棒による剛性の増大効果が大きく影響しており、載荷初期において間隙水圧がある程度発現しているにもかかわらず、軸ひずみがほとんど発生しないのはこのためであると考えられる。しかし、載荷回数が増して供試体内部に繰返し載荷による塑性ひずみが蓄積されてくると、今度は増大している間隙水圧によって剛性が急激に低下させられるため、軸ひずみの増大を伴って急激に破壊すると考えられる（三軸条件では、ダイレイタンスによる体積膨張により、間隙水圧の上昇分がある程度打ち消されるためそれほど急激には剛性が低下しない）。軸ひずみの急激な増大など、これらの変形特性の違いは現場の設計や安定管理に重要な問題となるため、間隙水圧の発達状況とともに、注目すべきポイントであると考えられている。

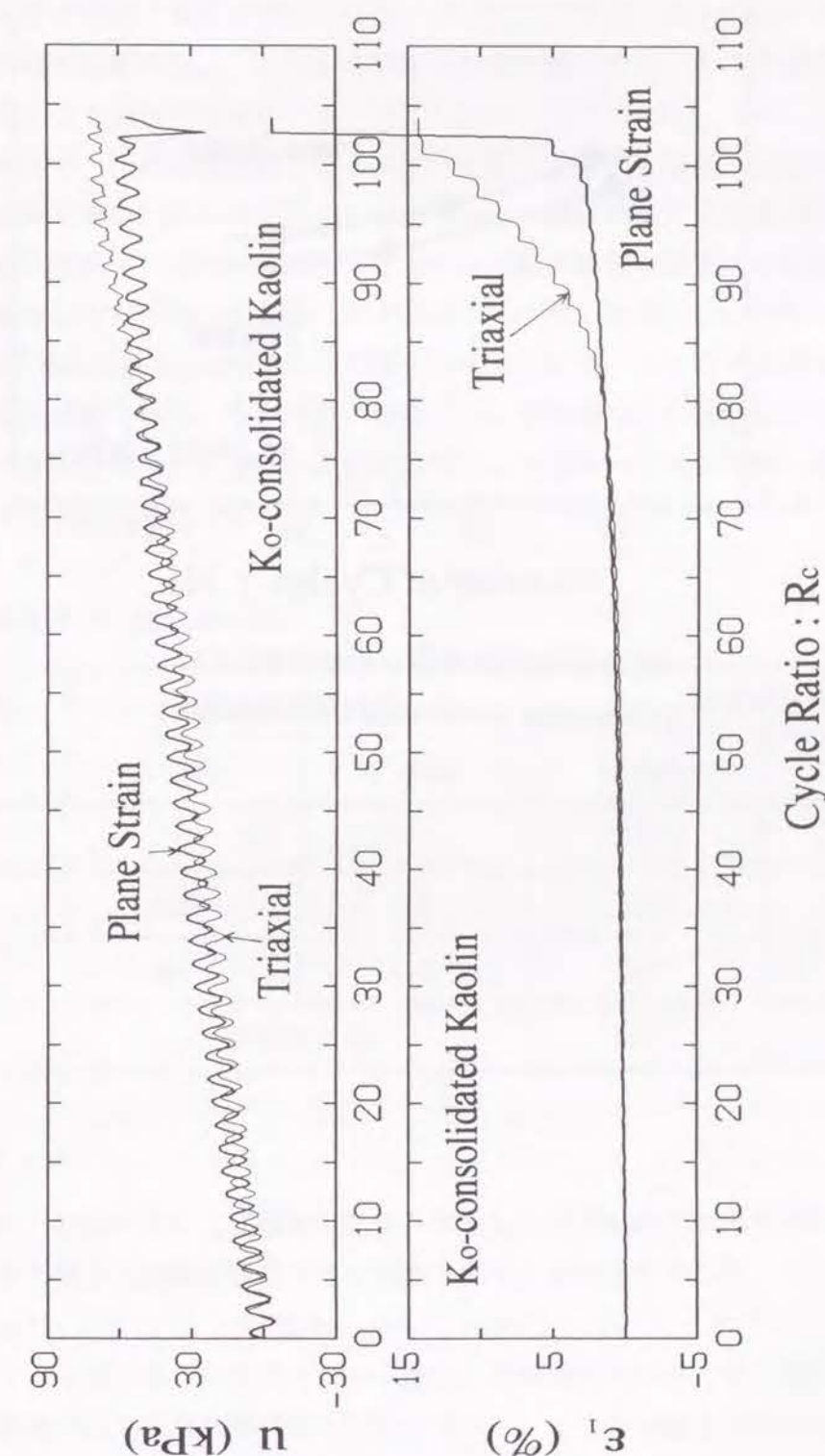


図 8-09 間隙水圧—載荷回数割合
(Cycle Ratio v. s. Pore Pressure)

図 8-10 軸ひずみ—載荷回数割合
(Cycle Ratio v. s. Axial Strain)

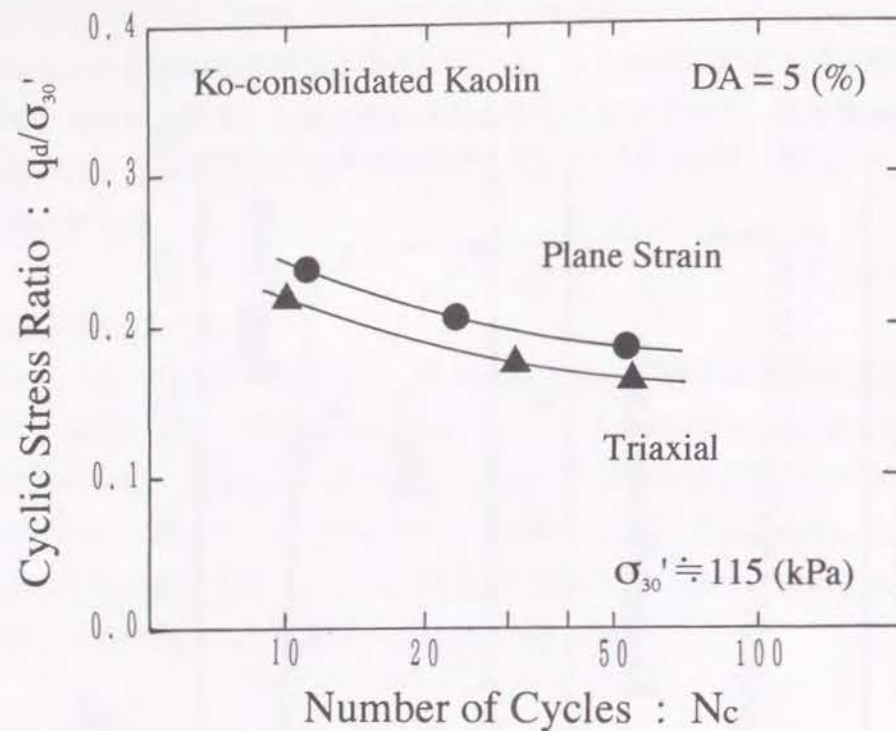


図 8-11 非排水繰返し載荷強度の比較
(Comparison of Undrained Cyclic Strength)

8.3.3 過圧密状態も含めた非排水繰返し平面ひずみ挙動

ここまでの結果から、K_o正規圧密粘土の非排水繰返し平面ひずみ挙動には、いくつかの特筆すべき特徴が存在することがわかった。よってここでは、K_o過圧密状態にある粘土についても同様の試験を行い、これらの特徴をさらに調べるとともに、静的せん断の結果（第6章参照）ともあわせて考察する。

ここまでの結果で、正規圧密状態にある粘土が繰返し破壊する場合、圧縮時の応力径路が降伏曲面に到達するいわゆる降伏型 (Yielding Type) の破壊形態を示すことがわかってい。よって、過圧密粘土の場合も圧縮時の応力径路が降伏曲面に到達する破壊形態が考えられるが、過圧密比が高くなった場合、応力径路が降伏面に到達しないかわりに除荷時に軸差応力の反転 (Reversal Type) が生じる可能性も考えられる。よってここでは、両者を想定した2ケースの試験を行い、それぞれの特性について考察した。供試体の圧密条件の一覧を表 8-03 に示したが、ここで用いた供試体についてもすべて同じ予備圧密ブロックから切り出し、整形されたものである。

表 8-03 供試体条件の一覧（過圧密）

過圧密比	最大圧密応力時		圧密終了時	
	p' (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q (kPa)
OCR				
1.0	—	—	146	95
1.2	196	118	182	94
1.7	199	118	147	35
1.0	静的せん断		201	117

(1) 応力径路

図 8-12 には、初期拘束圧で正規化した非排水繰返し載荷試験での応力径路を、同じ最大圧密履歴をもつ粘土の非排水静的せん断試験の結果とあわせて示した。よって、縦軸は $[(\sigma'_1 - \sigma'_3) / \sigma'_{30}]$ 、横軸は $[(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) / 3 / \sigma'_{30}]$ であり、また、第1サイクル目のみ1の数字をつけてある。この図を見ると、軽い過圧密粘土は繰返し載荷の圧縮端の応力径路が降伏面と交わっており、正規圧密粘土の場合と同様に繰返し載荷応力による試料の降伏が破壊の原因になっているものと考えられる。さらに、繰返し載荷の場合にも一種の破壊線が存在し、この破壊線が静的せん断試験で得られた限界状

態線と一致している点も注目される。これに対して、比較的過圧密比が高い粘土では、除荷側の応力経路が $q=0$ の軸と交わっている（すなわち、軸差応力の反転が生じている）が、伸張側の降伏面からはほど遠い。

このような場合、試料が破壊に至る条件は、いくつかの試験を行った結果、軸差応力の反転が必要であることがわかった。例を示すと、図 8-13 に示した結果（応力-ひずみ関係）では、伸張時の応力状態がほぼ $q=0$ 近くまで到達しているが、かろうじて軸差応力の反転は免れているため、ほとんど軸ひずみの振幅が発現していないことが確認できる（この図には、载荷サイクル 1, 9, 17, 25, 33, 41, 49, 57 のものを示してある）。すなわち、この破壊条件は、異方圧密した砂の場合と一致している。さらに、軸差応力の反転が生じた方は、破壊時の応力経路が正規圧密粘土の限界状態線を越えているが、これは過圧密粘土に対応する Hvorslev 面（この Hvorslev 面に関する文献としては、例えば Atkinson and Bransby (1977) などがある）に到達したものと考えられる。また、応力経路の傾きが繰返し载荷初期とその後半で異なっているが、载荷の初期段階における間隙水圧の増大割合が非常に大きいことの表れであると考えられる。

(2) 間隙水圧

図 8-14 には初期拘束圧で正規化した間隙水圧-軸ひずみ関係を、同じ最大圧密履歴を有する静的せん断の結果とあわせて示した。それぞれのデータは図 8-12 の供試体に対応しており、第 1 サイクル目のみ 1 の数字をつけてある。この図を見ると、軽い過圧密粘土では载荷側のサイクルで間隙水圧が生じ、これが蓄積されて試料が破壊に至っているのがわかる。発生する間隙水圧は繰返し载荷試験の方が小さいものの、その発達の傾向は静的挙動と類似しており、さらに、その最大値は、図 8-12 に示した応力経路において、圧密終了時と破壊時（静的せん断では限界状態に相当）の平均有効主応力の差にほぼ等しいことも確認できる。これらの特徴は正規圧密粘土の場合とも一致しており、破壊モードが同じであれば間隙水圧の挙動も同じになることが確認できる。一方、軸差応力の反転が生じている試料の場合には、これらの傾向が大きく異なっている。すなわち、間隙水圧は除荷側のサイクルで軸ひずみとともに大きく変動しており、これが原因で間隙水圧の蓄積が生じていると考えられる。また、ひずみ振幅が小さい段階から間隙水圧が大きく発達し、発生する間隙水圧の大きさも拘束圧の 70% 程度まで達している（応力経路も正規圧密粘土の限界状態線を越えている）点なども大きく異なっており、これらは異方圧密した飽和砂が繰返し破壊する際の傾向（第 7 章を参照）に近い。

(3) 応力-ひずみ関係

図 8-15 には応力-ひずみ関係を示した。ここで、縦軸は軸差応力（ $\sigma_1' - \sigma_3'$ ）であり、第 1 サイクル目のみ 1 の数字をつけてある。この図を見ると、 K_0 圧密による初期

せん断応力を受けているため、軽い過圧密粘土では軸ひずみは圧縮側でのみ増大し、除荷側での塑性仕事はほとんど生じていないのがわかる。この傾向は正規圧密粘土と同じであるが、比較的過圧密比の高い粘土ではその傾向が大きく異なる。すなわち、軸差応力の反転が生じているためか、除荷側が描くヒステリシスループが大きく、発生する塑性仕事量も大きいのがわかる。この点は、砂の場合と同じく、軸差応力の反転が粘土の非排水繰返し载荷挙動にも重大な影響を及ぼすことを示しているものと考えられる。

(4) 中間主応力の挙動

図 8-16 に中間主応力-軸ひずみ関係を示した。この図で、縦軸は中間主応力（ $\sigma_2' - \sigma_3'$ ）であり、第 1 サイクル目のみ 1 の数字をつけてある。この図を見ると、過圧密比の大小を問わず、中間主応力は軸ひずみの大きさにほぼ比例してそれ自身の大きさも振幅も増大しているのがわかる。これは、先に述べた正規圧密粘土の場合と同様であり、異方圧密粘土では中間主応力の発現がせん断ひずみに大きく依存することを示していると考えられる。なお、より詳細に調べると、正規圧密粘土の方が過圧密粘土よりも初期の段階から中間主応力が現れているのがわかるが、過圧密粘土では膨潤によってより等方に近い応力状態になっているため、中間主応力の発現に大きく影響する異方性の効果が消されているためと考えられる。また、この応力経路を π 平面上にプロットすると図 8-17 のようになり、破壊時の中間主応力係数（ b 値 = $(\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$ ）が静的せん断とほぼ同じ値の 0.30 程度になる点も注目される。

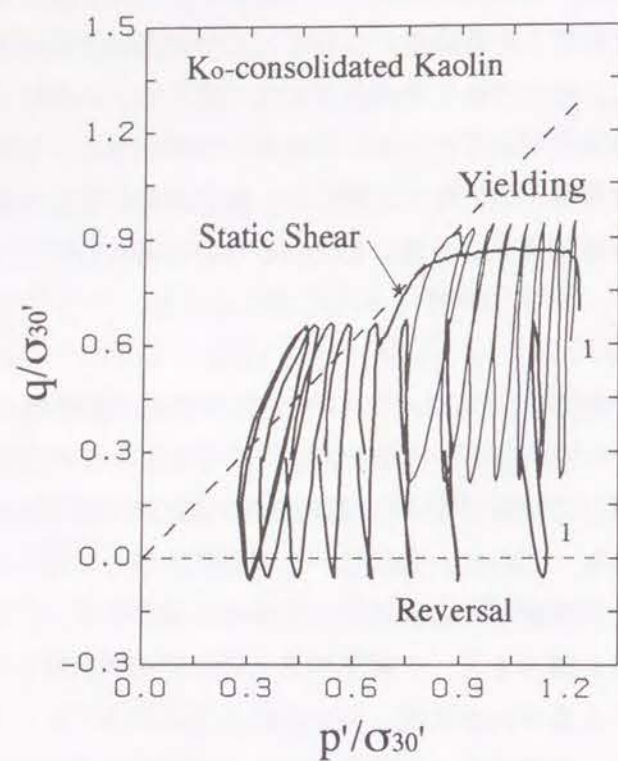


図 8-12 正規化応力経路
(Normalized Stress Path)

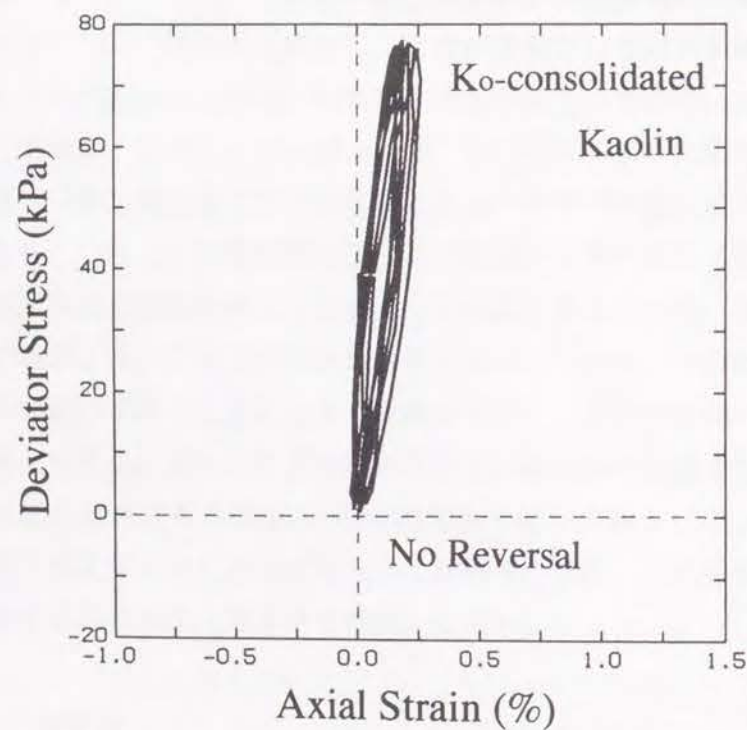


図 8-13 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

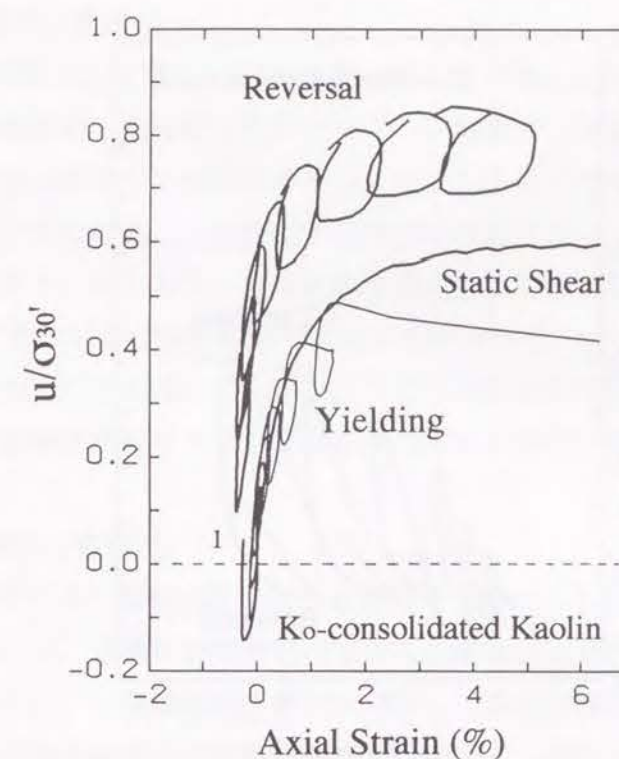


図 8-14 正規化間隙水圧-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Normalized Pore Pressure Relationships)

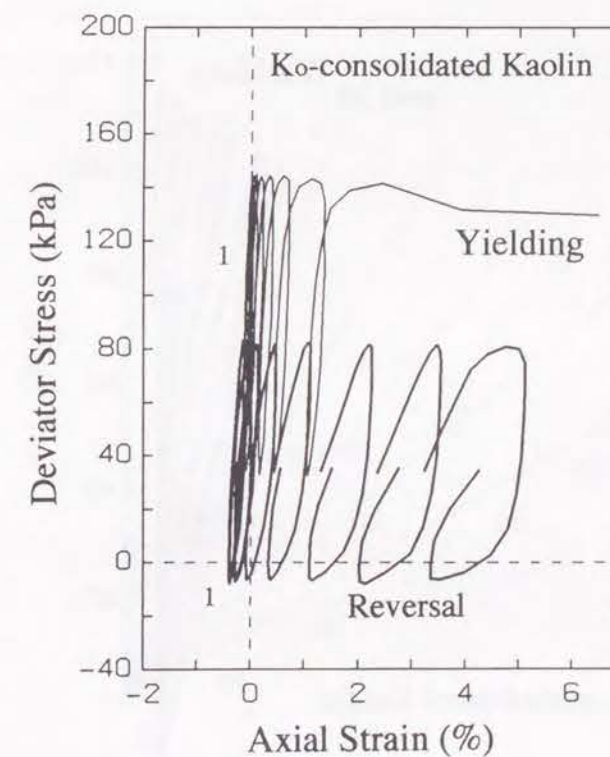


図 8-15 応力-ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Deviator Stress Relationships)

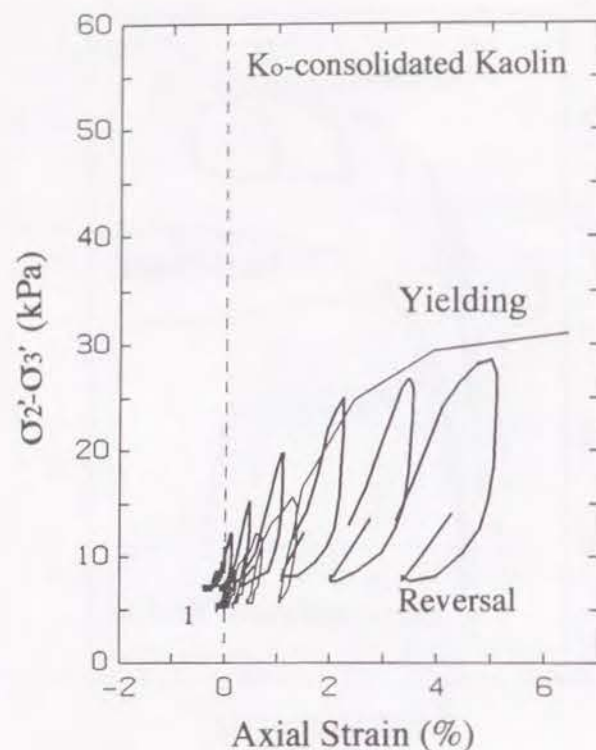


図 8-16 中間主応力－軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. Intermediate Principal Stress Relationships)

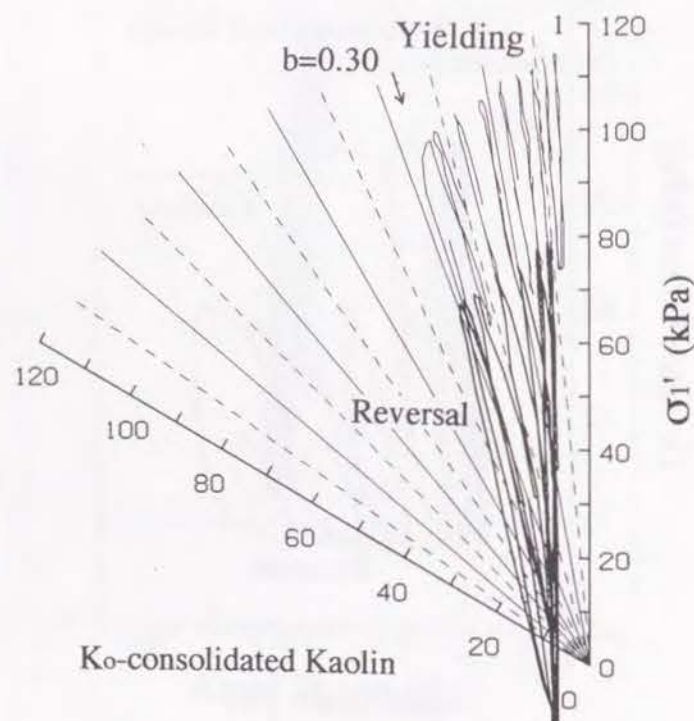


図 8-17 π 平面応力経路
(Stress Path on Octahedral Plane)

(5) 間隙水圧－載荷回数関係

図 8-18 に、間隙水圧と載荷回数割合（破壊時を 100とした時の割合）の関係を示した。この図より、正規圧密・過圧密にかかわらず、三軸条件とは異なって、平面ひずみ条件では間隙水圧－載荷回数割合の関係はやや上に凸となる傾向が確認できる。また、過圧密粘土では、正規圧密粘土に比べると発生する間隙水圧は大きい、これは圧密後の応力状態が異なるためである。すなわち、 K_o 状態を保ちながら除荷した供試体の応力状態はより等方的であり、同じ平均有効主応力であっても拘束圧は大きくなるためである。ただし、軸差応力の反転が生じたものは、上述のようにさらに大きな間隙水圧が発生しており、軸差応力の反転の影響がかなり大きな影響を与えているものと考えられる。

(6) 軸ひずみ－載荷回数関係

図 8-19 は軸ひずみ－載荷回数割合（破壊時を 100とした時の割合）の関係である。正規圧密粘土において、破壊直前での軸ひずみの急激な発達に平面ひずみ条件の大きな特徴の一つであったが、この特徴は過圧密粘土に対してもあてはまることが確認できる。すなわち、過圧密の程度や軸差応力の反転の有無によらず、軸ひずみの振幅が増大し始めると数サイクルで供試体は破壊に至っている。さらに、この傾向は破壊までの載荷回数によらないことより、平面ひずみ条件特有の性質であると考えられ、平面ひずみ条件にある粘土の非排水繰返し載荷挙動を考える際に非常に重要なポイントになると考えられる。

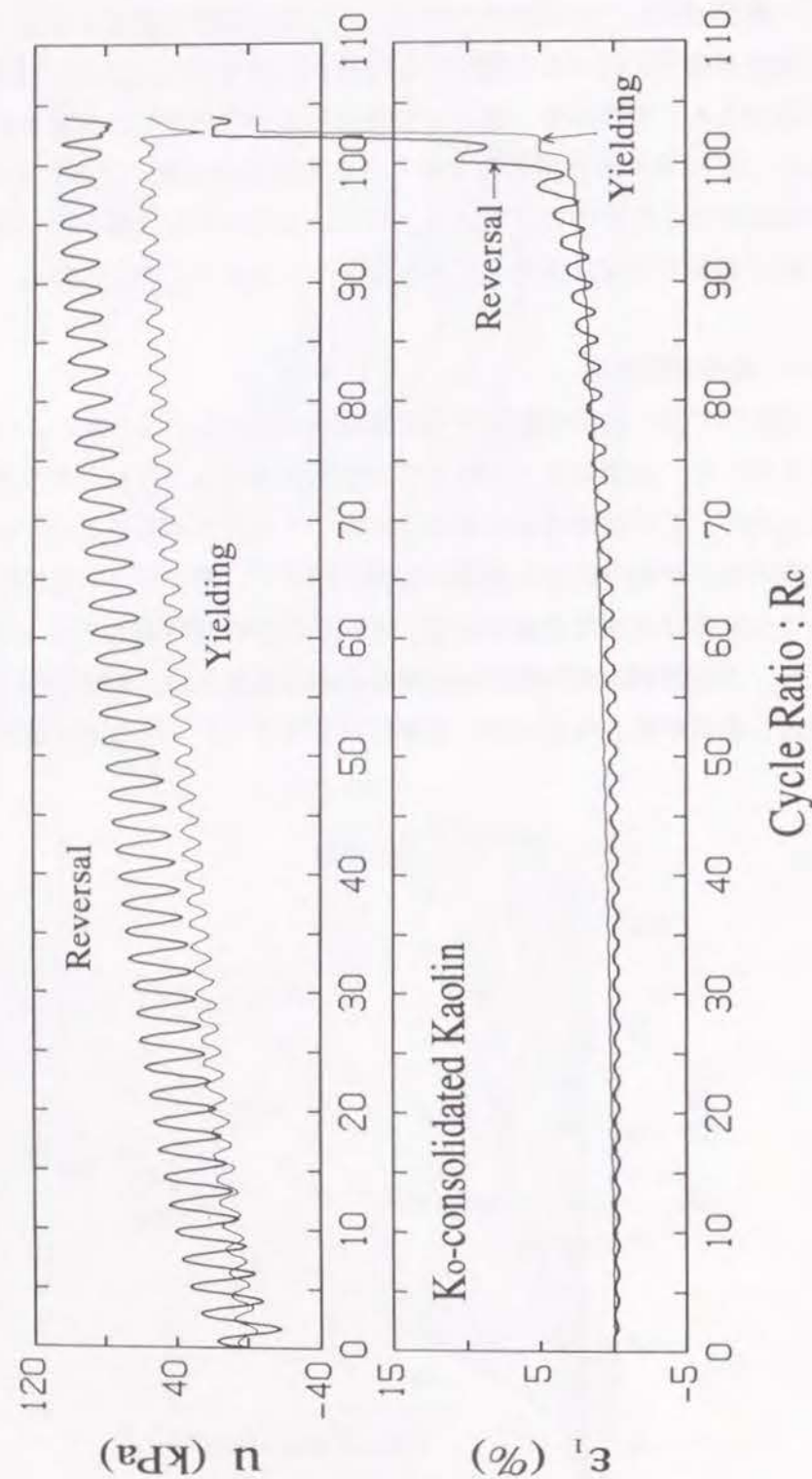


図 8-18 間隙水圧—載荷回数割合
(Cycle Ratio v. s. Pore Pressure)

図 8-19 軸ひずみ—載荷回数割合
(Cycle Ratio v. s. Axial Strain)

(7) 考察

粘土の非排水繰返し破壊については、2つのパターンが存在する。1つは、正規圧密粘土や軽い過圧密粘土のように、圧縮側の応力経路が降伏面に到達することによる降伏破壊（ここでは、Yielding Type と呼んで図示した）である。もう1つは、比較的過圧密比の高い粘土における、軸差応力の反転による間隙水圧の増大が引き金になる破壊（ここでは、Reversal Type と呼んで図示した）である。両者は、繰返し載荷を開始した直後から間隙水圧などの発達状況が異なり、基本的に破壊モードが異なると考えられる。軸差応力の反転は、異方圧密された（あるいは、初期せん断を受けた）砂が非排水繰返し破壊を生ずるための必要条件であったが、これは粘土にもあてはまることがわかった。すなわち、軸差応力の反転は、平面ひずみ条件にある土の非排水繰返し破壊においても、重大な要因となることが明らかになった。土のパラメータについては、非排水繰返し載荷と非排水静的せん断で、限界状態線などの強度パラメータが一致するという結果が得られた。また、繰返し載荷によって発生する間隙水圧についても、試料が降伏によって破壊に至る場合（軸差応力の反転が生ずるものを除く）には、軸ひずみと間隙水圧の関係がよく似ていることもわかった。これらの結果は、軸差応力の反転が生じるほどの繰返し応力がかかる場合を除けば、静的せん断試験の結果から繰返し載荷挙動が予測できる可能性を示していると考えられる。間隙水圧—載荷回数との関係がやや上に凸となる傾向や、供試体が破壊する数サイクル前から急激に軸ひずみが増大する傾向など、正規圧密粘土で見られたいくつかの特徴が過圧密粘土でも確認された。したがって、これらの性質は平面ひずみ条件特有のものであり、繰返し載荷条件においても、拘束枠は供試体の側方への変形自由度を低くして供試体の剛性を高めるとともに、ダイレイタンスの発達を抑える働きもすると考えられる。

8.4 まとめ

本章では、平面ひずみ条件における粘土の基本的な非排水繰返し載荷挙動を調べることを目的として、 K_0 圧密（正規圧密・過圧密）したカオリン粘土の非排水繰返し平面ひずみ試験を行い、その変形・強度特性について考察した。その際のポイントとしては、三軸挙動との違い、過圧密履歴の影響や中間主応力の挙動などが挙げられる。これらの試験を通して得られた結論は、以下のようにまとめられる。

(1) 平面ひずみ条件・三軸条件の違いについて

平面ひずみ条件と三軸条件における変形・強度特性の違いは、主に供試体の拘束条件の

違い（拘束枠の有無）に起因している。拘束枠は供試体の側方への変形自由度を低くして供試体の剛性を高めるとともに、ダイレイタンスの発達を抑える働きもすると考えられる。ここでは、K₀正規圧密粘土の非排水繰返し平面ひずみ挙動について、三軸試験での挙動の違いを中心にまとめる。

(a) 変形特性に関しては、間隙水圧挙動・軸ひずみ挙動ともに三軸試験の場合とは大きく異なっている。すなわち、間隙水圧は繰返し載荷の初期段階から比較的大きく増大し、軸ひずみについてはあるところで急激に増大して破壊に至る傾向がある。これらは、拘束枠による剛性の増大とダイレイタンスの抑制が原因であると考えられる。つまり、載荷の初期段階から間隙水圧がある程度発現しているのは、拘束枠によってダイレイタンスの発生（すなわち体積膨張）が抑制されるためと考えられる。また、載荷の初期段階で間隙水圧がある程度発現しているにもかかわらず軸ひずみがほとんど発生していないのは、拘束枠によって供試体の剛性が高められているためと考えられ、破壊の直前で軸ひずみが急激に増大するのは、三軸試験よりダイレイタンスが生じにくい（体積膨張による間隙水圧抑制効果が小さい）ため間隙水圧の上昇によって剛性が急激に低下するためであると考えられる。

(b) 非排水繰返し載荷強度に関しては、平面ひずみ条件の方が三軸条件よりも大きくなることがわかった。この結果は、砂の場合ともほぼ一致しており、拘束枠の影響で供試体の剛性が増大するとともに繰返し強度も大きくなるものと考えられる。なお、異方圧密カオリン粘土の場合、両者の強度差は約 10 %であった。

以上のように、平面ひずみ条件と三軸条件では、非排水繰返し強度のみならず、変形特性においても大きな相違点が存在する（特に、軸ひずみの急激な増大を伴う破壊など）ため、これらの違いを十分考慮した設計や安定管理をする必要があると考えている。

(2) 過圧密状態も含めた非排水繰返し平面ひずみ挙動について

ここでは、異方圧密状態にある粘土の非排水繰返し載荷挙動について、正規圧密状態にある場合と過圧密状態にある場合とをあわせて、その変形・強度特性についてまとめる。その際、上述の平面ひずみ条件と三軸条件との違いについても言及し、それらの特性の違いが平面ひずみ条件特有の現象であるのかについても考察する。

(a) 正規圧密粘土の結果より、平面ひずみ条件では三軸条件に比べると、載荷の初期段階から間隙水圧が大きく発達する一方で、破壊直前における軸ひずみの発達がかなり急激であることが明らかになっていたが、これらの特性は過圧密粘土についてもあてはまることが確認された。一口に過圧密粘土とは言っても、破壊までの載荷回数が違う場合や破壊モードが違う（降伏型と軸差応力反転型）場合など様々な状況が考えられるが、こういった違いによらずあてはまるということは、これらの特性が平面ひずみ条件特有のものであることを示していると考えられる。すなわち、拘束枠による供試体の剛性の増

加やダイレイタンス抑制の効果は、正規圧密・過圧密を問わず、平面ひずみ条件にある粘土の非排水繰返し平面ひずみ挙動全般にあてはまるものと考えられる。

(b) 異方圧密粘土の非排水繰返し破壊については、載荷時に応力が降伏曲面に到達して破壊する場合と、除荷時に軸差応力の反転が生じて破壊に至る場合とがあることがわかった。正規圧密粘土や軽い過圧密粘土が前者に相当するが、繰返し載荷時の応力経路が最大圧密時の降伏曲面を超えない限り破壊に至らず、この場合は土の降伏が破壊の原因となっていると考えられる。一方、比較的過圧密比の高い粘土では軸差応力の反転が破壊の必要条件となり、砂の場合と同様に塑性仕事の増大に伴う間隙水圧の蓄積が破壊の原因となっているものと考えられる。

(c) 2種類の破壊モードのうち、応力経路が降伏曲面に到達して破壊するケースでは、供試体が正規圧密にあるか過圧密にあるかを問わず、変形などの諸特性が極めて類似することがわかった。その一方で、軸差応力の反転（除荷時に応力経路が $q=0$ 軸に到達する）によって破壊するケースについては、異方圧密した砂の場合と同様に、塑性仕事量の増大にともなう過剰間隙水圧の蓄積が引き金となって破壊することがわかった。これらのモードの違いによって間隙水圧の挙動などは完全に異なるものとなり、軸差応力の反転が、砂の場合と同様に、粘土の非排水繰返し破壊にも重大な影響を及ぼすことが確認された。

(d) 静的せん断挙動との関係については、限界状態線の傾きや発生する間隙水圧の大きさなどが、非排水繰返し載荷と静的せん断でかなりよい一致が見られるなど、静的せん断の結果から繰返し載荷挙動がある程度予測できることがわかった。これらは、軸差応力の反転が生じる場合にはあてはまらないが、正規圧密粘土や軽い過圧密粘土では静的パラメータが繰返し載荷挙動をも支配することを示すものと考えられる。

(e) これまでの研究でも着目してきた中間主応力については、その発現がせん断ひずみに依存することや、破壊時の b 値が非排水静的せん断などの場合とほぼ同じ値の 0.30 程度になることも新たに確認された。

(3) 粘土の非排水繰返し載荷挙動全体について

本章では、K₀圧密状態にある粘土の非排水繰返し平面ひずみ試験を行い、その変形・強度特性を調べた。その結果、前項でまとめたように、平面ひずみ条件特有の力学特性をいくつか解明することができた。その中でも、粘土でも過剰間隙水圧の蓄積により急激に破壊に至るなど、砂の液状化に似た挙動をする場合があることがわかった点は意義深い。粘土に対して液状化という言葉を使うことの妥当性についての議論はあるが、粘土の非排水繰返し載荷挙動を考えていく上で、この変形特性は重要であると考えられる。また、繰返し載荷によって粘土でも急激な破壊に至ることは従来より指摘されているが、平面ひずみ状態ではこの傾向がさらに著しくなる（さらに急激に破壊に至る）ことを明らかにでき

たのは、本研究での重要な成果であると考えている。もっとも、ここで行った試験は、異方圧密状態（初期せん断を受けた状態）から軸差応力のみを振動させるものであり、条件が限定されている点には注意しなければならない。すなわち、交通荷重や潮汐・波浪による自重変化などについては適用できるが、地震時などを想定する場合には主応力軸の回転なども考慮しなければならない。

第9章 中間主応力係数を用いた 平面ひずみ強度の推定

9.1 概説

本研究では、平面ひずみ状態にある土の力学特性の解明を目的に、種々の平面ひずみ試験を行い、その変形・強度特性について調べてきた。平面ひずみ状態を考える場合、中間主応力は重要な要素であり、通常よく行われている三軸試験などとは最も異なる相違点の一つである。この中間主応力の挙動を定量的に評価するパラメータとして中間主応力係数（ b 値）があるが、限界状態における中間主応力係数の値が試料や試験条件などによらずほぼ 0.25~0.30 になることが明らかになったのは、本研究で得られたの最も重要な結論の一つである。よってここでは、中間主応力係数（ b 値）に着目し、これを用いて三軸試験の結果から平面ひずみ強度を推定する方法を提案する。まず最初に、行った全種類の試験について中間主応力係数の挙動を再整理し、限界状態における中間主応力係数がほぼ同じ値になることを確認する。そして、構成則の基本的なものとしてよく用いられている Cam-clay モデル型の強度定数「 M^* 」（詳細は後述）と中間主応力係数「 b 」値を用いて、三軸試験の結果から平面ひずみ強度を推定する方法について示す。

9.2 種々の試験での b 値

本研究で行った平面ひずみ試験の種類は、用いた試料、載荷条件、排水条件、圧密条件などの組み合わせによって全部で 10 種類ほどある。ここでは、これらの試験における中間主応力係数の挙動を、条件の類似した試験ごとにまとめて示す。

(1) 砂の非排水静的せん断（等方圧密&異方圧密）

図 9-01 に、飽和豊浦砂を用いた等方圧密・異方圧密非排水静的せん断試験における中間主応力係数の挙動を軸ひずみとの関係で示した。図には、初期間隙比の異なる 2 種類の等方圧密試料の結果（やや細い線）と 1 種類の異方圧密試料の結果（やや太い線）を併せて示してあり、また、限界状態に相当するところには矢印をつけた。この図を見ると、等方圧密と異方圧密とで初期段階での立ち上がりの差が見られるが、これは圧密による初期

応力状態が異なっているためである。すなわち、等方圧密した供試体の場合は、せん断開始時には σ_1' と σ_2' の大きさにほとんど差がなく、 b 値もほぼ 1.0に近い状態にあるが、せん断が進行すると σ_1' の方がその発達が速いために b 値も徐々に低下しているものと考えられる。一方、異方圧密した供試体の場合は、圧密段階から σ_1' と σ_2' （ $\equiv \sigma_3'$ ）：ほぼ K_o 圧密になっているため）には大きな差があり、せん断の進行とともに σ_2' が発達してくると b 値も増大しているものと考えられる。なお、これらの点を除けば、圧密条件や初期間隙比の違いによらず中間主応力係数は似たような挙動を示しており、限界状態では0.25（～0.30）とほぼ同じ値に収束しているのがわかる。図 9-02 には参考のため、 π 平面での応力経路を示してあるが、等方圧密と異方圧密でほとんど差がないことが確認できる。

(2) 砂の排水静的せん断（等方圧密&異方圧密）

図 9-03 には、飽和豊浦砂を用いた等方圧密・異方圧密排水静的せん断試験における中間主応力係数の挙動を軸ひずみとの関係で示した。この図でも初期間隙比の異なる等方圧密試料 2 種類（やや細い線）と異方圧密試料 1 種類（やや太い線）が併せて示してあり、限界状態に相当するところには矢印がつけてある。この図を見ると、非排水せん断の場合と同様に、等方圧密と異方圧密とでは初期段階の立ち上がりにはいくらかの差が見られるが、この部分を除けばせん断中はほとんど同じ挙動を示しているのがわかる。また、等方圧密の場合についても、圧密時の応力状態（等方： b 値が1.0に近い状態）が影響をおよぼしていると考えられるのはせん断開始直後のわずかな部分（軸ひずみで 1%未満）であり、その後は速やかに異方圧密の結果と同じ曲線に収束している。非排水せん断の場合と異なる点は b 値の収束状態であり、排水せん断では限界状態後も b 値は少しずつ増加しているが、限界状態に着目すれば圧密条件や初期間隙比の違いによらず b 値はほぼ 0.30 程度と同じ値になっているのがわかる。なお、図 9-04 には参考のため、 π 平面での応力経路を示してあるが、等方圧密と異方圧密でほとんど差がないことが確認できる。

(3) 粘土の異方圧密非排水静的せん断（正規圧密&過圧密）

図 9-05 には、飽和カオリン粘土を用いた異方（ K_o ）圧密非排水静的せん断試験における中間主応力係数の挙動を軸ひずみとの関係で示した。この図には、過圧密比が異なる 3 種類（ $OCR = 1.0, 1.8, 2.8$ ）の結果を併せて示してあり、また、限界状態に相当するところには矢印をつけた。この図を見ると、異方圧密粘土の場合には、過圧密比の大きさによらず b 値はほとんど同じ挙動を示していることがわかる。これは、限界状態における b 値が過圧密比によらないことを示しているとともに、 b 値の挙動（つまりは中間主応力の発達）が軸ひずみ（この場合は非排水せん断であるためせん断ひずみと考えることもできる）に大きく依存していることを示すものでもある。一方、図 9-06 には参考のため

め π 平面での応力経路を示してあるが、こちらで見ると過圧密比の影響は顕著である。すなわち、初期の応力経路の立ち上がりにおいて、過圧密比が大きいものほどより大きな b 値で立ち上がっている。この違いに関しては、第 6 章で述べたように、圧密終了時の応力状態の差（すなわち、過圧密比が大きくなると供試体の応力状態が等方的になること）に起因するものと考えられる。しかし、限界状態においては、図 9-05 からわかるように、過圧密比によらず b 値はほぼ 0.30 であることが確認できる。

(4) 砂の異方圧密非排水繰返し載荷

図 9-07 には、異方圧密した飽和豊浦砂を用いた非排水繰返し載荷試験における中間主応力係数の挙動を、 π 平面の応力経路として示した。図には異方圧密砂の非排水静的せん断の結果も併せて示してあるが、非排水繰返し載荷においても載荷中の b 値はほぼ一定であり、その値は静的せん断（非排水）と同じほぼ 0.25 であることが確認できる。

(5) 粘土の異方圧密非排水繰返し載荷（正規圧密&過圧密）

図 9-08 には、異方圧密した飽和カオリン粘土を用いた非排水繰返し載荷試験における中間主応力係数の挙動を、 π 平面の応力経路として示した。この図には、破壊モードの異なる 2 種類の結果（降伏による破壊型&軸差応力の反転による破壊型）を併せて示してあるが、繰返し載荷時の挙動は多少異なるものの、圧縮端において最終的にはほぼ同じ b 値の 0.30 辺りのところで破壊に至っているのが確認できる。

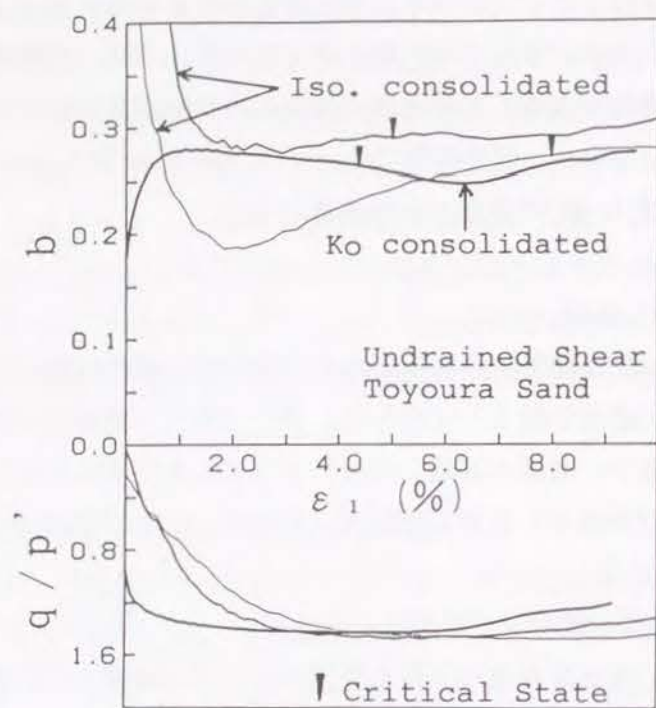


図 9-01 中間主応力係数-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. b-value Relationships)

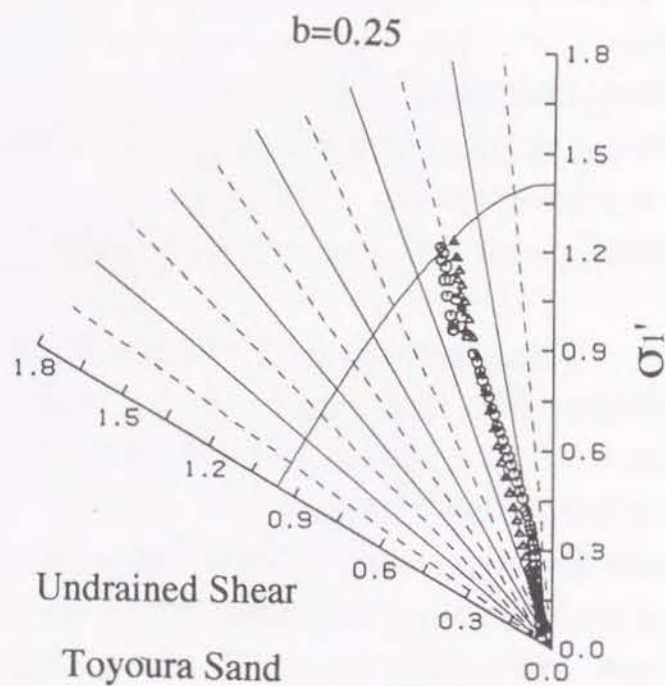


図 9-02 π 平面応力径路
(Stress Path on Octahedral Plane)

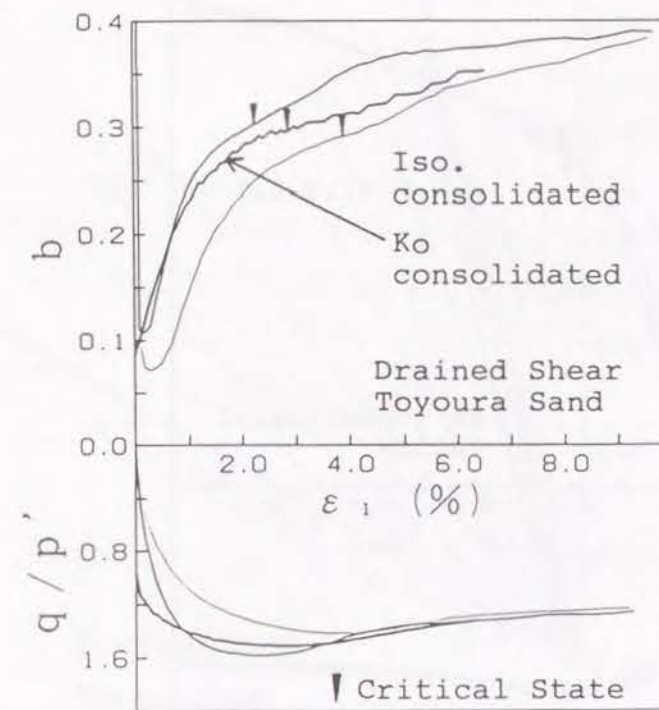


図 9-03 中間主応力係数-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. b-value Relationships)

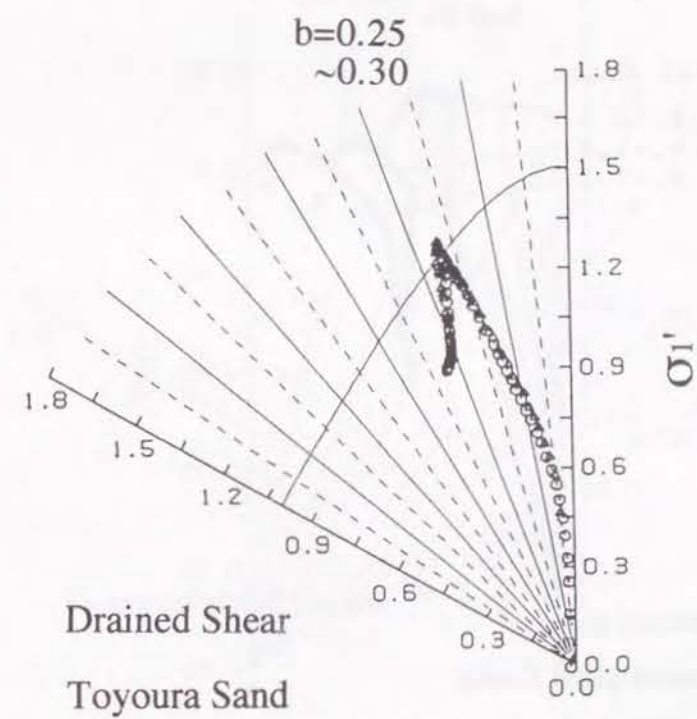


図 9-04 π 平面応力径路
(Stress Path on Octahedral Plane)

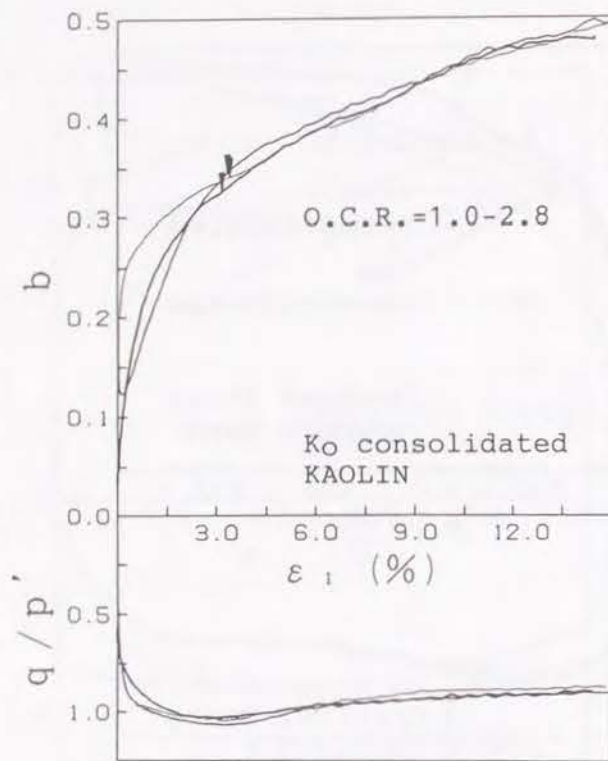


図 9-05 中間主応力係数-軸ひずみ関係
(Axial Strain v. s. b-value Relationships)

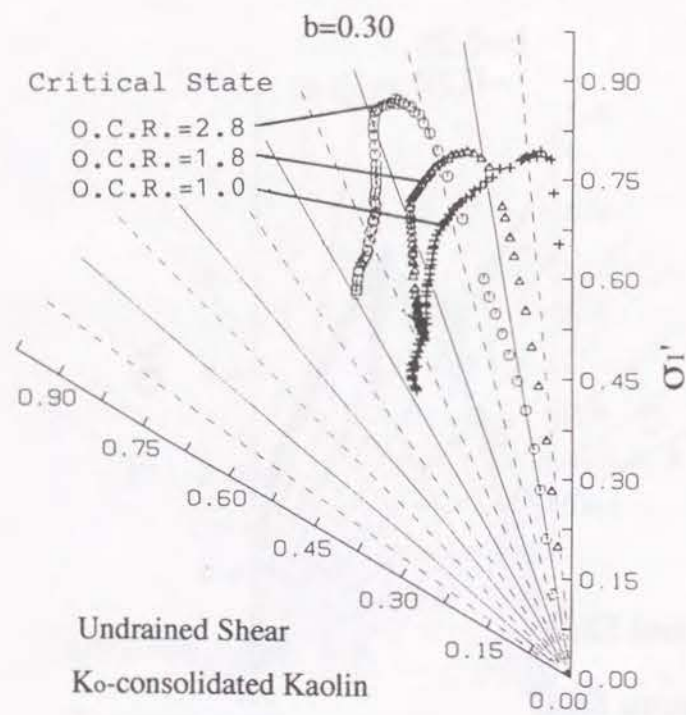


図 9-06 π平面応力径路
(Stress Path on Octahedral Plane)

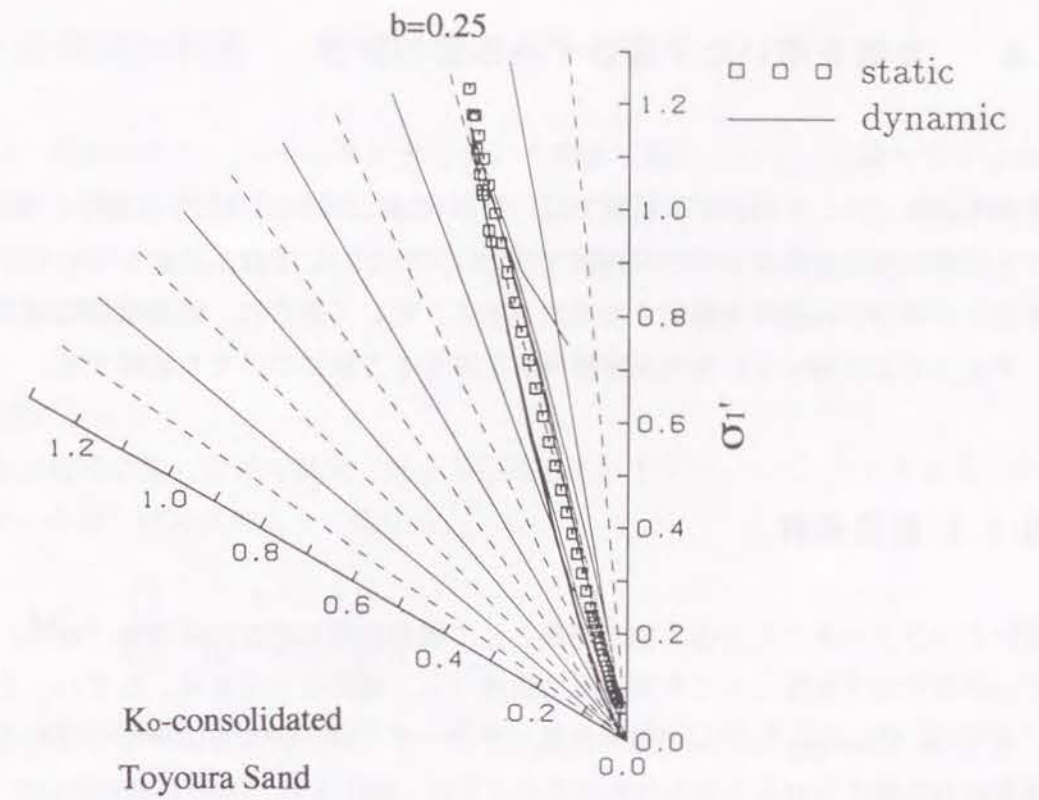


図 9-07 π平面応力径路
(Stress Path on Octahedral Plane)

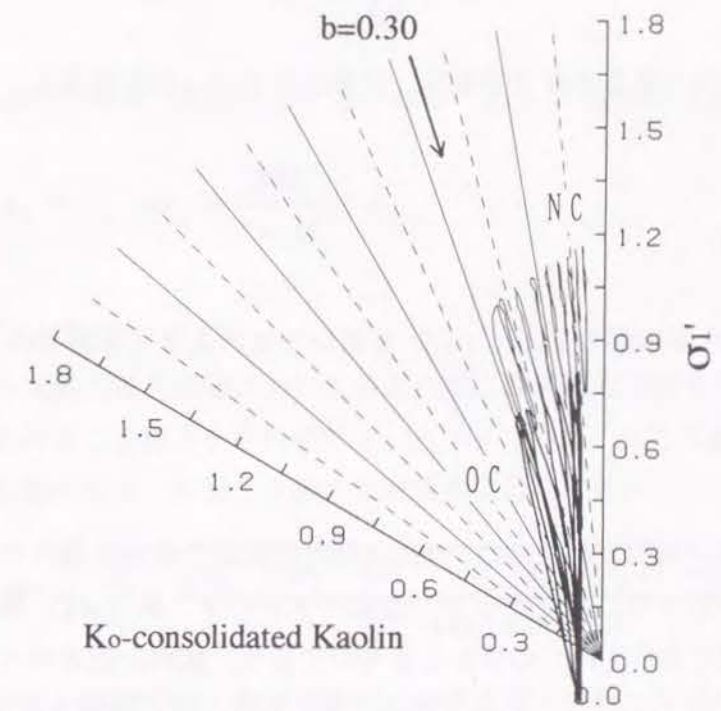


図 9-08 π平面応力径路
(Stress Path on Octahedral Plane)

9.3 b値を用いた平面ひずみ強度の計算

上述の結果より、平面ひずみ試験では、限界状態におけるb値が0.25~0.30と試験条件によらずほぼ一定になることが確認できた。よってここでは、b値を用いて三軸試験の結果から平面ひずみ強度を推定する方法を示す。そしてさらに、簡易解析などで強度パラメータとしてよく用いられる内部摩擦角を計算する方法についても誘導する。

9.3.1 前提条件

用いるパラメータとしては、強度定数として限界状態における応力比「 M^* 」と、平面ひずみ状態を表す定数として中間主応力係数「b」値の2つである。ただし、ここで用いる「 M^* 」は Cam-clay モデルの限界状態パラメータ：Mと同じ意味のものであるが、異なる3主応力条件にも対応させるため次式のように一般化された形のものをを用いた（例えば、新体系土工学（1981）第1章 1.6土の構成式参照）。

$$M^* = \frac{\sqrt{2} \cdot J_2}{\sigma_m} \quad (9-01)$$

この式で、 J_2 は偏差応力の第2不変量であり、通常の応力 σ_{ij} の不変量 I_1, I_2 を用いると次式で表される。

$$J_2 = \frac{I_1^2}{3} - I_2 \quad (9-02)$$

したがって式(1)は、正八面体応力 σ_{oct}, τ_{oct} を用いて次のようにも表される。

$$M^* = \frac{\sqrt{3} \cdot \tau_{oct}}{\sigma_{oct}} \quad (9-03)$$

すなわち、ここで用いる「 M^* 」は、 $\tau_{oct}-\sigma_{oct}$ の応力面上で考えた場合の限界状態応力比になっていることがわかる。したがって、このパラメータ「 M^* 」は、平面ひずみ・三軸といった試験の種類によらず同一の値をとるものであり、試料に固有のパラメータとなる。なお、b値や σ_m' についてはこれまで用いてきたものと同じ定義である。

9.3.2 計算式の誘導

ここでは、拘束圧が σ_r' のせん断試験における限界状態について、試験条件が三軸条件である場合と平面ひずみ条件である場合についてそれぞれ考える。そして、最終的には、 σ_r' をパラメータとして、 M^* あるいはbを用いて限界状態時の最大強度（軸差応力）を求める式を誘導する。

(1) 三軸試験について

三軸試験の限界状態における最大・最小主応力をそれぞれ σ_a', σ_r' とすると、限界状態パラメータ M^* は次式のように表せる。

$$M^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \frac{\sigma_a' - \sigma_r'}{(\sigma_a' + 2\sigma_r')/3} \quad (9-04)$$

この式より、限界状態での最大主応力 σ_a' を M^* と σ_r' を用いて表すと次式になる。

$$\sigma_a' = \frac{3 + 2M_1^*}{3 - M_1^*} \cdot \sigma_r' \quad (9-05)$$

$$\text{ただし、} M_1^* = \sqrt{\frac{3}{2}} \times M^*$$

よって、この時の強度（軸差応力） q_T は M^* と σ_r' を用いて以下のように表される。

$$q_T = \sigma_a' - \sigma_r' = \frac{3M_1^*}{3 - M_1^*} \cdot \sigma_r' \quad (9-06)$$

(2) 平面ひずみ試験について

平面ひずみ試験の限界状態においても上述の三軸試験と同様の展開をする。まず最初に限界状態における3主応力をそれぞれ $\sigma_1', \sigma_2', \sigma_r'$ （ただし、 $\sigma_1' > \sigma_2' > \sigma_r'$ ）とし、限界状態パラメータ M^* を表すと次式のようになる。

$$M^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \frac{\sqrt{\sigma_1'^2 + \sigma_2'^2 + \sigma_r'^2 - \sigma_1'\sigma_2' - \sigma_2'\sigma_r' - \sigma_r'\sigma_1'}}{(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_r')/3} \quad (9-07)$$

次に、平面ひずみ試験では、限界状態時の中間主応力係数：bが試験条件によらずほぼ一定になることより、限界状態時の中間主応力 σ_2' はb値および σ_1', σ_3' を用いると次式のように表せる。

$$\sigma_2' = b(\sigma_1' - \sigma_3') + \sigma_3' \quad (9-08)$$

この式をMを与える式(9-07)に代入して σ_2' を消去すると、 M^* は σ_1' 、 σ_r' 、 b を用いて次のように表せる。

$$M^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \frac{\sqrt{b^2 - b + 1} \times (\sigma_1' - \sigma_r')}{[(1+b) \cdot \sigma_1' + (2-b) \cdot \sigma_r'] / 3} \quad (9-09)$$

この式より、限界状態での最大主応力 σ_1' を M^* と b と σ_r' を用いて表すと次式になる。

$$\sigma_1' = \frac{3 + M_2^*(2-b)}{3 - M_2^*(1+b)} \cdot \sigma_r' \quad (9-10)$$

$$\text{ただし、} M_2^* = \sqrt{\frac{3}{2(b^2 - b + 1)}} \times M^*$$

よって、この時の強度（軸差応力） q_{PS} は M^* と b と σ_r' を用いて以下のように表される。

$$q_{PS} = \sigma_1' - \sigma_3' = \frac{3M_2^*}{3 - M_2^*(1+b)} \cdot \sigma_r' \quad (9-11)$$

9.3.3 実験結果との比較・考察

前項では、 M^* あるいは b を用いて、平面ひずみ・三軸条件での限界状態における強度を拘束圧 σ_r' をパラメータとして誘導する式を示した。よってここでは、これらの誘導した式を実験の実験結果にあてはめ、その妥当性を評価・考察する。

(1) 内部摩擦角の計算

三軸試験の結果を用いて平面ひずみ強度を計算する場合、強度を表すパラメータとして例えば内部摩擦角を計算する式を誘導しておいた方が有用である。ここで、内部摩擦角は式(14)で表されるものとし、これはMohr-Coulombの規準からくるものである。

$$\phi' = \arcsin \left[\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} \right] \quad (9-12)$$

よって、式(9-05)あるいは式(9-10)から、三軸・平面ひずみ試験における内部摩擦角がそ

れぞれ以下のような式で求められる。

$$\sin \phi'_T = \frac{3M_1^*}{6 + M_1^*} \quad (9-13)$$

$$\sin \phi'_{PS} = \frac{3M_2^*}{6 + M_2^*(1-2b)} \quad (9-14)$$

(2) 実験結果との比較・考察

本研究で行った試験のうち、粘土と砂の例をそれぞれ一つずつ取り上げ、ここで誘導された式による結果と比較しながらその妥当性について検討する。

まず最初に、カオリン粘土を用いたKo圧密非排水静的せん断試験結果を例に、ここで誘導した式をあてはめてみる。試験結果より、 M^* 、 b は次の値となっている。

$$M^* = 0.84 \quad b = 0.30$$

この値を上式(15)、(16)に代入して計算すると、三軸・平面ひずみ試験における内部摩擦角は次のような値になった。

$$\phi'_{PS} = 32.6^\circ \quad \phi'_T = 26.1^\circ$$

一方、実験結果より両試験での内部摩擦角は次のようである。

$$\phi'_{PS} = 29.8^\circ \quad \phi'_T = 26.2^\circ$$

両者を比較すると、三軸試験では一致しているものの、平面ひずみ試験では計算による値の方が10%程度大きくなっている。

次に、飽和豊浦砂を用いた等方圧密排水静的せん断試験の結果にあてはめてみる。砂質土の場合、内部摩擦角は初期間隙比の値に左右されるが、ここでは初期間隙比が約0.7である場合について考える。この場合、試験結果より、 M^* 、 b は次の値となっている。

$$M^* = 1.35 \quad b = 0.25$$

この値を上式(9-13)、(9-14)に代入して計算すると、三軸・平面ひずみ試験における内部摩擦角は次のような値になった。

$$\phi'_{PS} = 52.7^\circ \quad \phi'_T = 40.3^\circ$$

一方、実験結果より両試験での内部摩擦角を読みとると次のようである。

$$\phi'_{PS} \approx 45^\circ \quad \phi'_T \approx 40^\circ$$

両者を比較すると、粘土の場合と同様に、やはり平面ひずみ試験では計算による値の方が10%程度大きくなっている。

以上の結果より、誘導された平面ひずみ強度の計算式は試験結果より常に10%程度大きな値を与えることがわかる。この理由としては、パラメータとして用いた M^* が、拡張された von Mises の規準に相当するものであるためと考えられる。すなわち、Mohr-Coulomb の規準に比べると、 π 平面上で θ の値が大きくなる（中間主応力中間主応力が発現する）にしたがって強度も大きく評価することになるためであると考えられる。したがって、より正確に平面ひずみ強度を求めるためには、例えば松岡・中井の規準(1974)などのように θ に依存する強度（破壊）規準式を用いればよい。この辺りの議論に関しては、この規準の提案者である松岡(1981)によってもなされているが、平面ひずみ強度と三軸強度の関係については本研究で誘導した式のような簡単な形では表せない。よってここでは、破壊規準の幾何学的な関係からこの強度差を比較する。

図 9-09 は、同じ三軸強度をもつ場合の各破壊規準の違いを π 平面上にプロットしたものである。この図より、von Mises の規準と松岡・中井の規準は幾何学的に見て約10%程度の差があり、実験値と提案した計算式とによる結果の差に一致している。本研究で行った平面ひずみ試験の結果が松岡・中井の規準によく合っていたことを考えると、これによりここで提案した計算式の妥当性が確認できる。すなわち、ここで提案した計算式によって得られた値を10%小さくすることで平面ひずみ強度が計算できることになる。なお、図 9-09 を見てもわかるように、平面ひずみ条件に相当する b 値（ b 値=0.25~0.30程度）の辺りでは、拡張された Tresca の規準と松岡・中井の規準が交差している。このことは、強度パラメータとして Tresca 型のものを用いて上述の誘導を行えば、試験結果に合致した計算ができることを示している。すなわち、ここでは M^* として式(9-01)で示されるような一般化された形のものを用いているが、三軸試験で得られるような次式の形で M を決定し、これを用いれば計算できることを示している。

$$M = \frac{q}{p'} = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')/3} \quad (9-15)$$

この場合、せん断強度として中間主応力は考慮されないことにはなるが、限界状態での強度を求めることのみを目的とする場合、便宜上このような計算をしても差し支えないものと考えている。具体的な計算式としては、式(9-05)、(9-06)、(9-10)、(9-11)、(9-13)、(9-14)において、 M^* を式(9-15)で表される M で置き換えればよい。

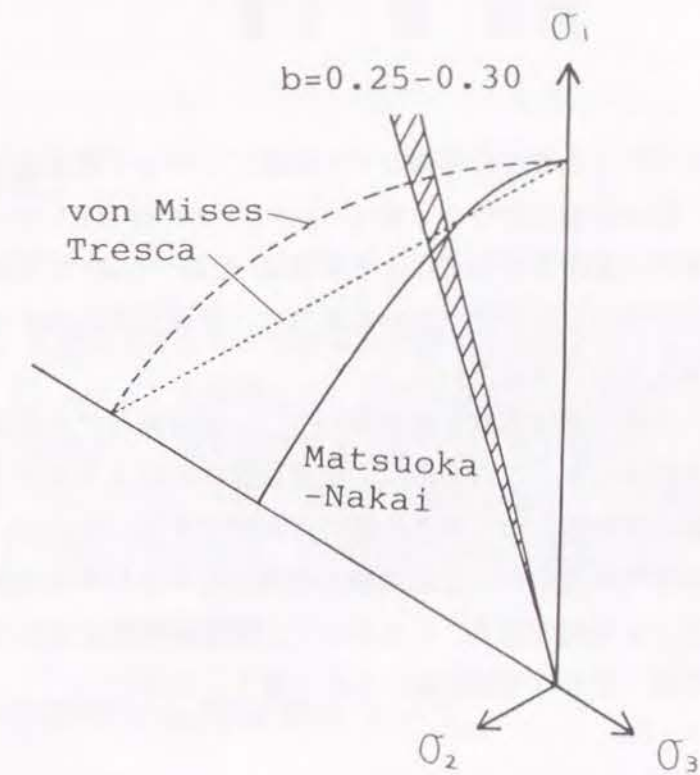


図 9-09 各種破壊規準
(Failure Criteria)

本章ではまず、本研究で行った種々の平面ひずみ試験における中間主応力の挙動についてまとめた。その結果、限界状態における b 値 $[= (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')]$ は、用いた試料、載荷条件、排水条件、圧密条件などによらずほぼ 0.25~0.30 になることがわかった。この結果は、本論文でもたびたび述べているように、平面ひずみ条件にある土の挙動を考える上で非常に重要であると考えている。

また、本章では、この中間主応力係数 b 値を用いて、三軸試験などの結果から平面ひずみ強度を計算する方法を提案した。この方法は、限界状態における平面ひずみ強度を求めるものであり、中間主応力が発達しつつある段階には適用できないものの、限界状態における平面ひずみ強度が推定できるほか、三軸試験の結果から平面ひずみ試験における内部摩擦角などを計算することも可能である。したがって、簡易解析などを行う場合に内部摩擦角 ϕ' の推定に利用でき、その有用性は高いものと考えられる。

10.1 概説

本研究では、平面ひずみ条件における土の挙動を明らかにすることを目的とし、平面ひずみ試験装置（システム）の構築から、この装置を用いた試験データの収集、結果の考察までを行った。対象とした試料は砂質土と粘性土、せん断条件としては静的せん断と非排水繰返し載荷について行い、土の平面ひずみ挙動全般について検討した。ここでは、試験結果をもとにして得られた結論を、各章の順を追ってまとめる。

10.2 砂の静的せん断挙動について

第5章では、飽和豊浦砂を用いて、平面ひずみ条件における砂の静的せん断特性について調べた。行った試験の種類は、等方圧密試料の非排水・排水静的せん断と、 K_0 圧密状態を基準とする異方圧密試料の非排水・排水静的せん断である。これらの試験によって得られた結論を以下に示す。

(1) 間隙水圧の挙動については、せん断による土粒子の負のダイレイタンスー効果が大きく現れ、非排水せん断では間隙水圧がかなり大きな負の値に収束し、排水せん断では体積ひずみがかなり膨張側で収束することがわかった。これらの傾向は、異方圧密した場合や供試体の密度が大きくなった場合にさらに顕著になり、土粒子の噛み合わせが密になっていることを示していると考えられる。また、異方圧密径路の違いによる影響については、 K_0 圧密したものは p' 一定径路や σ_3' 一定径路で圧密（排水圧縮）したものに比べると供試体の剛性が最も大きくなり、体積ひずみの圧縮性・圧縮量も一番大きくなることがわかった。なお、間隙水圧や体積ひずみが最終的には一定値に収束しているが、この段階が限界状態にあたると判断できる。

(2) 応力-ひずみ関係については、供試体の密度が大きくなると最大強度も大きくなるとともに強度のピークも顕著に現れるようになることが確認された。さらに、排水せん断では供試体の密度の増大とともにピーク強度時までの軸ひずみ量も小さくなる傾向があり、

非排水せん断では負のダイレイタンスによる有効拘束圧の増大のためピークの現れ方は排水せん断に比べると全体的に顕著であることもわかった。異方圧密径路の違いの影響については、異方圧密試料ではせん断開始直後の軸差応力・中間主応力の立ち上がりが急になりピーク強度に至るまでの軸ひずみ量も小さくなる傾向があることがわかったが、上述の間隙水圧や体積ひずみの挙動と同様に、土粒子の噛み合わせの違いの影響によるものと考えられる。なお、一般的に三軸条件に比べると平面ひずみ条件ではせん断応力のピークの現れ方が顕著であり、せん断強度も大きくなることが確認された。

(3) 応力径路に関しては、非排水せん断の場合、負のダイレイタンスによる間隙水圧の影響がかなり大きく現れるためせん断初期の段階で急に限界状態線に近づき、それ以降は限界状態線に漸近しながら最大強度に至ることがわかった。一方、排水せん断の場合は、過剰間隙水圧が発生しないためほぼ傾き一定 (≈ 3.0) の直線状ではあるが、やや上に凸の形状となった。これは、せん断が進行するにつれて中間主応力が徐々に大きくなっていくため、通常の軸対称三軸状態に比べると平均有効主応力の増分が中間主応力の分だけ大きくなり、応力径路の傾きが 3.0 より小さくなるためであると考えられる。なお、限界状態線の傾きは圧密条件や排水条件によらずほぼ一定の $1.4 \sim 1.5$ 程度であるが、異方圧密した場合にはやや大きくなる傾向があることがわかった。

(4) 中間主応力については、ピークの位置が軸差応力のそれと一致しており、その増減の様子も軸差応力にほぼ比例していることがわかった。これを中間主応力係数に置き換えてみると、せん断開始後 b 値はすみやかに $0.2 \sim 0.3$ になり、その後はほぼ一定またはわずかに増加しながら破壊に至ることになる。この様子を π 平面でみるとさらに明確になるが、排水条件によって径路の形状や限界状態での収束値にいくらかの差はあるものの、圧密履歴の違いによる影響などはほとんど認められないことがわかった。なお、破壊時の中間主応力係数については、拘束圧や供試体の初期密度によらず $0.25 \sim 0.30$ であり、圧密条件やせん断中の排水条件などによって多少は異なるもののほとんど同じ値になることが明らかにした。

10.3 粘土の静的せん断挙動について

第6章では、飽和カオリン粘土を用いて、平面ひずみ条件における粘土の静的せん断特性について調べた。行った試験は、 K_o 圧密試料（正規圧密・過圧密ともに含む）の非排

水静的せん断試験であり、圧密履歴が及ぼす影響や粘土・砂におけるせん断特性の違いについて検討した。これらの試験を通して得られた結論を以下に示す。

10.3.1 正規圧密・過圧密の関係

(1) 応力-ひずみ関係については、正規圧密粘土も含め、過圧密比によってその形状はほぼ唯一的に定まることが確認された。また、過圧密比が大きくなると最大強度も大きくなるが、逆に、初期ヤング率は少しずつ小さくなる傾向があった。最大強度が大きくなるのは過圧密によって供試体の密度が大きくなるためと考えられるが、膨潤によって供試体の応力状態がより等方的になって異方圧密特有の性質が失われるために初期ヤング率は小さくなったと考えられる。なお、最大強度を初期拘束圧で正規化したものと過圧密比との間には唯一的な関係があることがわかったが、ここでは実験式としての誘導にとどめた。

(2) 応力径路についても、上述の応力-ひずみ関係と同様に、過圧密比によってその形状が唯一的に定まっており、過圧密比が大きくなると初期の応力径路の立ち上がりの量も大きくなり、より限界状態線に近いところで折れ曲がることがわかった。これは、最大圧密履歴が同じ場合、試料の降伏曲面も同一になることから、過圧密比が大きくなるに従って応力径路が限界状態線に近いところで降伏曲面に到達するためと考えられる。

(3) 間隙水圧についても過圧密比によってその挙動が唯一的に定まることが確認された。すなわち、間隙水圧はせん断開始後徐々に増大して限界状態付近で一定値に収束し、過圧密比が大きくなると間隙水圧の収束値は小さくなり、発生間隙水圧の初期勾配については過圧密比の大きさと逆になくなる傾向も見られた。これらは、先行圧密による供試体の剛性の増大と、膨潤による供試体の応力状態の等方化のためと考えられる。なお、最大強度の場合と同様に、発生する最大間隙水圧の値を初期拘束圧で正規化したものと過圧密比との間にも唯一的な関係が存在することがわかった。

(4) 中間主応力については、過圧密比によらずその挙動はほとんど同じになることがわかった。これを π 平面上で見ると、応力径路はせん断開始後直ちに破壊包絡線のすぐ内側に達し、その後ゆっくりとこの包絡線に漸近するように移動することもわかった。また、ピーク強度時における b 値については、正規圧密粘土の場合 0.1 以下であり、過圧密比が大きくなるにつれて大きな値をとるようになっていた。これは、圧密終了時の供試体の応力状態に起因しており、過圧密比が大きい供試体の場合、正規圧密した供試体に比べて圧密

後の応力状態がより等方的であり、 b 値の分母を与える $(\sigma_1' - \sigma_3')$ の値がせん断開始時にはあまり大きくないためであると考えられる。なお、限界状態時の b 値については、上述のように過圧密比によらずほぼ 0.30 であることが明らかになったが、過圧密比によらず同じ値をとることは注目すべき点であると考えている。

10.3.2 砂との比較

(1) 間隙水圧は砂の場合、正の間隙水圧が発生するのはせん断初期の一部分に過ぎず、ほとんどが負の値、それもかなり大きな負の値をとりながら限界状態に至り、一定値に収束していた。一方、粘土では、正規圧密・過圧密にかかわらず間隙水圧は増大するのみで、限界状態ではほぼ一定値に収束している。これは、粘土のダイレイタンスによる体積膨張が砂ほど顕著ではないためと考えられる。

(2) 応力-ひずみ関係は砂の場合、負のダイレイタンスの影響で下に凸の応力-ひずみ曲線になっていた。一方、粘土については、圧密による異方性の影響で、正規圧密・過圧密を問わずに極めて小さい軸ひずみでピーク強度に至っており、上述の間隙水圧と比べてもその変動は急激である。したがって、砂のようにピーク強度と限界状態とは一致せず、これらの状態に対応する軸ひずみ量も異なるが、ピーク強度と限界状態での強度にはあまり差はないことがわかった。また、中間主応力については、砂の場合、軸差応力とその増減の様子がほぼ一致しているが、粘土では、ピーク強度後も中間主応力は増大し続けて限界状態付近で一定値に落ち着く傾向があることが明らかになった。

(3) 応力経路は砂の場合、せん断中に発生する負の間隙水圧が大きく影響し、せん断開始直後から限界状態線に漸近するような応力経路となっていた。一方、粘土では、せん断開始直後の急激な軸差応力の増大によりほぼ真上に立ち上がるような応力経路になっている。この形状は、通常の等方圧密せん断試験などで見られるものとは大きく異なり、異方圧密の特有の性質であると考えられる。なお、同じ最大圧密履歴を持つ供試体では応力経路が同じ降伏面に依存している点は上述のとおりである。

(4) 中間主応力は砂の場合、供試体の密度などの試験条件によらず、せん断開始後間もなく b 値はほぼ一定 ($b=0.25$) になり、限界状態に至っていた。一方、粘土では、せん断開始後直ちにピーク強度に至るが、この時の b 値は過圧密比によって異なっており、過圧密比が小さいほど b 値も小さくなることがわかった。しかし、限界状態に着目すると、砂

の場合のように過圧密比などの大きさによらず b 値はほぼ同じ値 ($b \approx 0.30$) に収束することが明らかになった。

10.4 砂の非排水繰返し載荷挙動について

第7章では、平面ひずみ条件における砂の基本的な非排水繰返し載荷特性を調べることを目的に、種々の条件の下で行った試験結果をもとに、その力学特性について考察した。考慮した圧密条件としては等方圧密と異方圧密 (K_0 圧密など) とがあるが、より積極的に偏差応力を作用させるために拘束圧を振動させる試験も行った。これらの試験を通して得られた結論を以下に示す。

10.4.1 平面ひずみ試験・三軸試験の違いについて

(1) 液状化後の応力振幅については、三軸試験ではその減少が著しいのに対して、平面ひずみ試験ではほとんど振幅が変化しないことがわかった。これは、平面ひずみ条件では拘束棒によって液状化後も供試体の剛性がある程度保たれるためであると考えられる。

(2) 軸ひずみ振幅の挙動については、三軸試験では初期液状化に至るまで軸ひずみがほとんど発達せず、液状化後に急激に増大する傾向にあった。一方、平面ひずみ試験では載荷の初期段階から軸ひずみ振幅が発達し、供試体が液状化した後も軸ひずみ振幅はそれほど急激には増大しない点が大きく異なることがわかった。これらの違いも、拘束棒の有無による側方拘束の違いに起因すると考えられる。

(3) 間隙水圧の挙動については、三軸試験では液状化後比較的すみやかにその振幅が小さくなっているのに対して、平面ひずみ試験では液状化後もかなり大きく発達している点が大きく異なることがわかった。この違いについても、やはり拘束棒の有無に起因すると考えられるが、平面ひずみ条件では側方拘束によって液状化後も供試体の剛性がある程度維持され、除荷時でも有効拘束圧をある程度保ちながら軸ひずみの急激な増大を抑制するものと考えられる。

10.4.2 圧密条件の違いについて

(1) 応力経路に関しては、異方圧密した供試体では载荷の始めから圧縮側が限界状態線に沿うような定常的なループを描いているのに対して、等方圧密した供試体では応力経路は平均有効主応力軸に沿って徐々に原点側に近づきながらやがて限界状態線に沿ったループ(8の字型)を描くことがわかった。これは、両者は基本的に試験条件が異なっているためと考えられるが、その一方で、圧密終了時の応力状態から平均有効主応力が減少する方向に応力経路が移動しているという点では同様の挙動とも考えられる。なお、異方圧密した場合、試料が液状化破壊するためには平面ひずみ条件においても軸差応力の反転が不可欠であることがわかった。また、等方圧密・異方圧密を問わず、非排水繰返し载荷で見られる限界状態線は静的せん断試験で得られたものと一致することもわかった。

(2) 軸ひずみの挙動については、異方圧密した供試体では载荷中の軸ひずみは圧縮側にのみ発達してそのまま圧縮破壊するのに対して、等方圧密した供試体では载荷方式の影響でいくぶん伸張側に軸ひずみが偏るものの残留ひずみはほとんど生じないことがわかった。これは、異方圧密した供試体では常に初期せん断力が軸圧方向に作用しているため、繰返し载荷の進行に伴う過剰間隙水圧の上昇によって軸ひずみは非排水クリープのような圧縮挙動を示したものと考えられる。

(3) 間隙水圧の挙動については、軸圧载荷時に発生する間隙水圧の正負が全く異なっていることがわかった。すなわち、異方圧密した供試体では最初の1サイクルを除くと圧縮時に間隙水圧が減少しているが、等方圧密した供試体では圧縮時に間隙水圧が増加している。この原因としては、土粒子構造の異方性に起因するダイレイタンスの影響が考えられる。つまり、異方圧密されると供試体内の土粒子の噛み合わせが密になり、圧縮応力が加わった時に体積の圧縮よりもダイレイタンスによる体積膨張の方が顕著に現れるものと考えられる。

(4) 中間主応力の挙動については、等方圧密した供試体ではほとんどその効果が見られなかったのに対して、異方圧密した供試体では繰返し载荷の初期段階から中間主応力係数がほぼ一定の値になるという事実が明らかになった。さらに、この値は、静的せん断試験によって得られる b 値にほぼ等しく、平面ひずみ条件にある土の挙動を考えていく上で重要な発見であると考えている。中間主応力は平面ひずみ試験特有のものであるが、等方圧密は平面ひずみ条件として本来的ではなく、繰返し载荷時の応力レベルも静的せん断に比べるとかなり小さかったため、等方圧密した場合にはその効果が現れにくかったものと考え

られる。ただし、中間主応力の大きさとしてはほとんど現れていないが、液状化時の軸ひずみ振幅が小さくなるなど、等方圧密の場合もその効果は無視できないものと考えられる。

(5) 本研究では、より積極的に供試体に繰返し偏差応力を加える目的で軸圧・セル圧両振り試験を行った結果、片振り試験とは異なり間隙水圧が負の値にまで振れること、液状化強度も片振り試験と比べると4%程度大きくなることなどがわかった。これらは、セル圧を軸圧とは逆位相で振動させた効果であると考えられる。しかし、繰返し载荷時の応力状態を考えると、繰返し载荷の効果として基本的には片振りの場合と大差はないため、全般的には片振り試験と同様の傾向が得られたものと考えている。

10.4.3 液状化強度について

(1) 等方圧密した場合と異方圧密した場合では、液状化強度は根本的に異なる。これは、等方圧密の方が文字どおり等方応力状態で供試体を繰返し圧縮・伸張する試験であるのに対して、異方圧密の方は初期せん断を受けた状態から軸方向の圧縮応力を増減させる試験であることによると考えられる。したがって、異方圧密の方は繰返し载荷中に軸差応力の反転が生じている時間の割合も極めて少なく、等方圧密の場合とは根本的に破壊モードが異なっているものと考えられる。

(2) 平面ひずみ試験と三軸試験との液状化強度の比較については、平面ひずみ強度の方が約20%程度大きくなることがわかった。平面ひずみ試験では拘束棒によって文字どおり供試体の変形が拘束されるため、拘束条件の違いがこのような強度の差となって現れたものと考えられる。

(3) 平面ひずみ試験と中空ねじり試験との液状化強度については、両者がほぼ一致することがわかった。この理由としては、平面ひずみ試験・中空ねじり試験ともに、供試体が平面ひずみ状態にあることが考えられ、平面ひずみ条件での液状化強度を求める上で注目すべき結果であると考えている。しかし、強度としてはほとんど同じになるものの、平面ひずみ試験では軸方向への繰返し圧縮を行っているのに対して、中空ねじり試験では主応力軸の回転による繰返し単純せん断を行っている点に注意しなければならない。すなわち、中空ねじり試験では直接繰返しせん断応力を加えているのに対して、平面ひずみ試験では間接的に繰返しせん断応力を加えている点が異なっていることを考慮すべきである。

10.5 粘土の非排水繰返し載荷挙動について

第8章では、平面ひずみ条件における粘土の基本的な非排水繰返し載荷挙動を調べることが目的として、 K_0 圧密（正規圧密・過圧密）したカオリン粘土の非排水繰返し平面ひずみ試験を行った。その際のポイントとしては、三軸挙動との違い、過圧密履歴の影響や中間主応力の挙動などが挙げられる。これらの試験を通して得られた結論を以下に示す。

10.5.1 平面ひずみ条件・三軸条件の違いについて

(1) 変形特性に関しては、三軸試験の場合とは大きく異なり、平面ひずみ条件では間隙水圧は繰返し載荷の初期段階から比較的大きく増大し、軸ひずみについてはあるところで急激に増大して破壊に至る傾向があることがわかった。これらは、拘束枠による剛性の増大とダイレイタンスの抑制が原因であると考えられる。つまり、載荷の初期段階から間隙水圧がある程度発現しているのは拘束枠によってダイレイタンスの発生が抑制されるためと考えられ、また、載荷の初期段階で間隙水圧がある程度発現しているにもかかわらず軸ひずみがほとんど発生していないのは拘束枠によって供試体の剛性が高められているためと考えられる。また、破壊の直前で軸ひずみが急激に増大するのは、三軸試験よりダイレイタンスが生じにくいため間隙水圧の上昇によって剛性が急激に低下するためであると考えられる。

(2) 非排水繰返し載荷強度に関しては、平面ひずみ条件の方が三軸条件よりも大きくなることがわかった。この結果は、砂の場合ともほぼ一致しており、拘束枠の影響で供試体の剛性が増大するとともに繰返し強度も大きくなるものと考えられる。なお、異方圧密カオリン粘土の場合、両者の強度差は約 10 %であった。

10.5.2 過圧密状態も含めた非排水繰返し平面ひずみ挙動について

(1) 変形特性に関しては、正規圧密・過圧密を問わず、平面ひずみ条件では三軸条件に比べると、載荷の初期段階から間隙水圧が大きく発達する一方で、破壊直前における軸ひずみの発達はかなり急激であることがわかった。一口に過圧密粘土とは言っても、破壊までの載荷回数が違う場合や破壊モードが違う（降伏破壊型と軸差応力反転破壊型）場合など

様々な状態が考えられるが、このような違いによらず急激な破壊を示すということは、これらの特性が平面ひずみ条件特有のものであることを示していると考えられる。すなわち、拘束枠による供試体の剛性の増加やダイレイタンス抑制の効果は、正規圧密・過圧密を問わず、平面ひずみ条件にある粘土の非排水繰返し平面ひずみ挙動全般にあてはまるものと考えられる。

(2) 異方圧密粘土の非排水繰返し破壊については、載荷時に応力が降伏曲面に到達して破壊する場合と、除荷時に軸差応力の反転が生じて破壊に至る場合とがあることがわかった。正規圧密粘土や軽い過圧密粘土が前者に相当するが、繰返し載荷時の応力経路が最大圧密時の降伏曲面を超えない限り破壊に至らず、この場合は土の降伏が破壊の原因となっていると考えられる。一方、比較的過圧密比の高い粘土では軸差応力の反転が破壊の必要条件となり、砂の場合と同様に塑性仕事の増大に伴う間隙水圧の蓄積が破壊の原因となっているものと考えられる。

(3) 2種類の破壊モードのうち、応力経路が降伏曲面に到達して破壊するケースでは、供試体が正規圧密にあるか過圧密にあるかを問わず、変形などの諸特性が極めて類似することがわかった。その一方で、軸差応力の反転によって破壊するケースについては、異方圧密した砂の場合と同様に、塑性仕事量の増大にともなう過剰間隙水圧の蓄積が引き金となって破壊することがわかった。これらのモードの違いによって間隙水圧の挙動などは完全に異なるものとなり、軸差応力の反転が、砂の場合と同様に、粘土の非排水繰返し破壊にも重大な影響を及ぼすことが確認された。

(4) 静的せん断挙動との関係については、限界状態線の傾きや発生する間隙水圧の大きさなどが、非排水繰返し載荷と静的せん断でかなりよい一致が見られるなど、静的せん断の結果から繰返し載荷挙動がある程度予測できることがわかった。これらは、軸差応力の反転が生じる場合にはあてはまらないが、正規圧密粘土や軽い過圧密粘土では静的パラメータが繰返し載荷挙動をも支配することを示すものと考えられる。

(5) これまでの研究でも着目してきた中間主応力については、その発現がせん断ひずみに大きく依存していることや、破壊時の b 値が非排水静的せん断などの場合とほぼ同じ値の 0.30 程度になることも新たに確認された。この結論は、本研究で行ったすべての試験にあてはまるものであり、平面ひずみ条件における土の挙動を考える上で非常に重要なポイントになると考えている。

10.6 中間主応力係数を用いた平面ひずみ強度の推定について

第9章では、本研究で行った種々の平面ひずみ試験における中間主応力の挙動についてまとめ、限界状態における b 値 $[=(\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')]$ は、用いた試料、載荷条件、排水条件、圧密条件などによらずほぼ0.25~0.30になることを示した。この結果は、本論文でもたびたび述べているように、平面ひずみ条件にある土の挙動を考える上で非常に重要であると考えている。

また、第9章では、この中間主応力係数 b 値を用いて、三軸試験などの結果から平面ひずみ強度を計算する方法を提案した。この方法は、限界状態における平面ひずみ強度を求めるものであり、中間主応力が発達しつつある段階には適用できないものの、限界状態における平面ひずみ強度が推定できるほか、三軸試験の結果から平面ひずみ試験における内部摩擦角などを計算することも可能である。したがって、簡易解析などを行う場合に内部摩擦角 ϕ' の推定に利用でき、その有用性は高いものと考えられる。

参考文献

- Ampadu, S. I. K. and Tatsuoka, F. (1988): 'The influence of initial shear on undrained behaviour of normally consolidated Kaolin', 第23回土質工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 501-504
- Ampadu, S. I. K. and Tatsuoka, F. (1989): 'The dry versus the wet methods of setting clay specimen for triaxial testing', 第24回土質工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 609-612
- Atkinson, J. H. and Bransby, P. L. (1977): 'The Mechanics of Soils (An Introduction to Critical State Soil Mechanics)', McGraw-Hill Book Company Limited
- Authur, J. R. F. and Assadi, A. (1977): 'Ruptured sand sheared in plane strain', Proc. of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 19-22
- Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K., Andresen, A. and Brown, J. D. (1971): 'A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength', Geotechnique, Vol. 21, No. 4, pp. 273-328
- Bjerrum, L. and Landva, A. (1966): 'Direct simple shear test on Norwegian quick clay', Geotechnique, Vol. 16, No. 1, pp. 1-20
- Campanella, R. G. and Vaid, Y. P. (1973): 'Influence of stress path on the plane strain behaviour of a sensitive clay', Proc. of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 85-92
- Cornforth, D. H. (1964): 'Some experiments on the influence of strain conditions on the strength of sand', Geotechnique, Vol. 14, No. 2, pp. 143-167
- 土質工学会：飽和土の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会 (1987): '飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験仕様', (社)土質工学会
- 土質試験法編集委員会編 (1990): '土質試験の方法と解説', (社)土質工学会

- 土木学会編 足立紀尚・龍岡文夫共著 (1981): '新体系土工学 18 土の力学 (Ⅲ)
第1章 土の静的変形・強度特性 1.6 土の構成式', 技報堂出版, pp. 122-131
- Finn, W. D. L., Wade, N. H. and Lee, K. L. (1967): 'Volume changes in triaxial and plane strain tests', Proc. of ASCE, SM6, pp. 297-308
- Green, G. E. and Bishop, A. W. (1969): 'A note on the drained strength of sand under generalized strain conditions', Geotechnique, Vol. 19, No. 1, pp. 144-149
- Green, G. E. and Reades, D. W. (1975): 'Boundary conditions, anisotropy and sample shape effects on the stress-strain behaviour of sand in triaxial compression and plane strain', Geotechnique, Vol. 25, No. 2, pp. 333-356
- Hambly, E. C. and Roscoe, K. H. (1969): 'Observations and predictions of stresses and strains during plane strain of "wet" clays', Proc. of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 173-181
- Hansen, B. (1961): 'Shear box tests on sand', Proc. of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 127-131
- Henkel, D. J. and Wade, N. H. (1966): 'Plane strain tests on a saturated remolded clay', Proc. of ASCE, Vol. 92, SM6, pp. 67-80
- Hyodo, M., Murata, H. and Yasufuku, N. (1991): 'Undrained cyclic shear strength and residual shear strain of saturated sand by cyclic triaxial tests', Soils and Foundations, Vol. 31, No. 3, pp. 60-76
- 長谷川高士, 内田一徳, 木全卓 (1990): '標準圧密・ \overline{CU} 三軸圧縮試験による粘土の構成パラメータの推定', 農業土木学会論文集, No. 145, pp. 97-98
- 市原松平, 松沢宏 (1970): '平面ひずみ状態と軸対称ひずみ状態における乾燥砂のせん断特性', 土木学会論文報告集, Vol. 173, pp. 47-59
- Kjeoornan, W. (1951): 'Testing the shear strength of clay in Sweden', Geotechnique, Vol. 2, No. 3, pp. 225-232

- Ko, H. -Y. and Scott, R. F. (1967): 'A new soil testing apparatus', Geotechnique, Vol. 17, No. 1, pp. 40-57
- Kimata, T., Hasegawa, T. and Uchida, K. (1995): 'Undrained cyclic plane strain behaviour of a clay', Proc. of 10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (10ARC), No. 1, pp. 29-32
- 木全卓, 長谷川高士, 内田一徳 (1994): '粘土の K_o 圧密非排水静的平面ひずみ挙動', 農業土木学会論文集, No. 170, pp. 83-90
- Lade, P. V. (1981): 'Torsion shear apparatus for soil testing', Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP740, R. N. Yong and F. C. Townsend, Edition, American Society for Testing and Materials (ASTM), pp. 145-163
- Lade, P. V. and Duncan, J. M. (1973): 'Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soil', Proc. of ASCE, Vol. 99, SM10, pp. 793-812
- Lee, K. L. (1970): 'Comparison of plane strain and triaxial tests on sands', Proc. of ASCE, Vol. 96, SM3, pp. 901-923
- Marachi, M. Dean, Duncan, J. M., Chan, C. K. and Seed, H. B. (1981): 'Plane-strain Testing of sand', Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP740, R. N. Yong and F. C. Townsend, Edition, American Society for Testing and Materials (ASTM), pp. 294-302
- Matsuoka, H. and Nakai, T. (1974): 'Stress-deformation and strength characteristics of soil under three dimensional principal stress', 土木学会論文報告集, Vol. 62, pp. 59-74
- Matsuoka, H. (1981): 'Prediction of plane strain strength for soils from triaxial compression', Proc. of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 4, pp. 682-683
- Mitachi, T. and Kitago, S. (1980): 'Undrained triaxial and plane strain behaviour of saturated remolded clay', Soils and Foundations, Vol. 20, No. 1, pp. 13-28

Miura, S. and Toki, S. (1982) : ' A Sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand ', Soils and Foundations, Vol. 22, No. 1, pp. 61-77

望月美登志, 福島伸二 (1991) : ' 標準試験としての大型三軸・平面ひずみ圧縮試験の適用性 ', 三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 181-186

Morgenstern, N. R. and Tchalenko, J. S. (1967) : ' Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear ', Geotechnique, Vol. 17, No. 33, pp. 309-328

Oda, M. and Konishi, J. (1974) : ' Rotation of principal stresses in granular material during simple shear ', Soils and Foundations, Vol. 14, No. 4, pp. 39-53

Oda, M. Koshikawa, I. and Higuchi, T. (1978) : ' Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test ', Soils and Foundations, Vol. 18, No. 1, pp. 25-38

越智健三, 龍岡文夫, 山本博之 (1984) : ' ねじりせん断液状化強度と三軸液状化強度の関係について ', 第19回土質工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 583-586

落合英俊 (1985) : ' ヤーキーの静止土圧係数式 ', 土と基礎, Vol. 33, No. 4, pp. 61-63

Pradhan, T. B. S., Tatsuoka, F. and Horii, N. (1988) : ' Simple shear testing on sand in a torsional shear apparatus ', Soils and Foundations, Vol. 28, No. 2, pp. 95-112

Roscoe, K. H. (1953) : ' An apparatus for the application of simple shear to soil sample ', Proc. of 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 186-191

Rowe, P. W. (1969) : ' The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear ', Geotechnique, Vol. 19, No. 1, pp. 75-86

Saada, A. S. and Baah, A. K. (1967) : ' Deformation and failure of a cross anisotropic clay under combined stresses ', Proc. of 3rd Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 67-88

Schofield, A. N. and Wroth, C. P. (1968) : ' Critical State Soil Mechanics ', McGraw-Hill Book Company Limited

Scott, R. F. and Ko, H. -Y. (1969) : ' Stress-deformation and strength characteristics ', Proc. of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State of the Art Volume, pp. 1-49

Shibata, T. and Karube, D. (1965) : ' Influence of the variation of the intermediate principal stress on the mechanical properties of normally consolidated clays ', Proc. of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 359-363

Skempton, A. W. and Bishop, A. W. (1950) : ' The measurement of the shear strength of soils ' Geotechnique, Vol. 2, pp. 90-108

Tatsuoka, F., Molenkamp, F., Torii, T. and Hino, T. (1984) : ' Behavior of lubrication layers of platens in element tests ', Soils and Foundations, Vol. 24, No. 1, pp. 113-128

Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. and Fukushima, S. (1986a) : ' Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressure ', Soils and Foundations, Vol. 26, No. 1, pp. 65-84

Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M. (1986b) : ' Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods ', Soils and Foundations, Vol. 26, No. 3, pp. 23-41

Tatsuoka, F., Sonoda, S., Katsushige, H., Fukushima, S. and Pradhan, T. B. S. (1986c) : ' Failure and deformation of sand in torsional shear ', Soils and Foundations, Vol. 26, No. 4, pp. 79-97

龍岡文夫 (1983) : ' 第2回三軸圧縮試験実技講習会報告 ', 土と基礎, Vol. 32, No. 4, pp. 94-97

龍岡文夫, 福島伸二, 後藤聡, 榎戸完治 (1984) : ' 砂の三軸圧縮及び平面ひずみ圧縮における供試体形状効果 ', 第19回土質工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 345-348

龍岡文夫, 佐藤剛司, 大河内保彦, 福島伸二 (1983): '三軸およびねじりせん断試験装置の設計と製作における若干の経験について', 土と基礎, Vol. 31, No. 7, pp. 41-48

土岐祥介, 三浦清一, 山下聡 (1986): '飽和砂の非排水繰返し三軸強度に及ぼすB値の影響', 第21回土質工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 565-568

Uchida, K., Kimata, T. and Hasegawa, T. (1991): 'Cyclic strength and deformation characteristics of saturated sand in plane strain test', Proc. of 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (9ARC), No. 1, pp. 83-91

内田一徳, 木全卓, 長谷川高士 (1988): '平面歪・三軸試験による飽和豊浦砂の繰返し非排水強度・変形特性の比較', 土質工学会「土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム」論文集, pp. 79-84

内田一徳, 木全卓, 長谷川高士 (1990): '平面ひずみ・三軸試験による飽和豊浦砂の繰返し非排水強度・変形特性の比較', 農業土木学会論文集, No. 145, pp. 65-71

Vaid, Y. P. and Campanella, R. G. (1974): 'Triaxial and plane strain behaviour of natural clay', Proc. ASCE, Vol. 100, GT3, pp. 207-224

Yamada, Y. and Ishihara, K. (1979): 'Anisotropic Deformation Characteristics of Sand under Three Dimensional Stress Conditions', Soils and Foundations, Vol. 19, No. 2, pp. 79-94

山本陽一, 兵頭正幸, 村田秀一, 安福規之, 杉山太宏 (1992): '粘土の非排水繰返しせん断特性に及ぼす載荷周波数の影響', 第27回土質工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 903-906

Yoshimi, Y. and Oh-oka, H. (1973): 'A ring torsion apparatus for simple shear tests', Proc. of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1. 2, pp. 501-506

その他著者に関する学会報告等 (年代順)

内田一徳, 長谷川高士, 木全卓 (1987): '繰返し平面歪試験による豊浦砂の液状化特性', 第44回農業土木学会京都支部研究発表会講演要旨集, pp. 44-45

長谷川高士, 内田一徳, 木全卓, 藤井睦 (1988): '粘性土の圧密・三軸試験結果に対する理論的考察', 昭和63年度農業土木学会大会講演要旨集, pp. 294-295

内田一徳, 木全卓, 長谷川高士 (1988): '平面歪・三軸試験による飽和豊浦砂の繰返し非排水強度・変形特性の比較', 昭和63年度農業土木学会大会講演要旨集, pp. 288-289

内田一徳, 木全卓, 長谷川高士 (1989): 'K_o圧密土の繰返し平面ひずみ挙動', 第24回土質工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 765-768

内田一徳, 木全卓, 長谷川高士 (1989): '異方圧密飽和豊浦砂の繰返し平面歪挙動', 平成元年度農業土木学会大会講演要旨集, pp. 436-437

長谷川高士, 内田一徳, 木全卓 (1989): '豊浦砂のせん断特性に及ぼす圧密履歴の影響', 第46回農業土木学会京都支部研究発表会講演要旨集, pp. 44-45

木全卓, 内田一徳, 長谷川高士 (1990): 'K_o圧密した飽和砂の非排水繰返し両振り平面ひずみ試験', 第25回土質工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 741-742

木全卓, 内田一徳, 長谷川高士 (1990): '飽和砂のK_o圧密非排水両振り繰返し平面ひずみ試験', 平成2年度農業土木学会大会講演要旨集, pp. 438-439

木全卓, 内田一徳, 長谷川高士 (1991): '粘性土のK_o圧密非排水平面ひずみ試験', 平成3年度農業土木学会大会講演要旨集, pp. 466-467

木全卓, 内田一徳, 長谷川高士 (1991): '粘土のK_o過圧密非排水平面ひずみ試験', 第48回農業土木学会京都支部研究発表会講演要旨集, pp. 130-131

木全卓, 内田一徳, 長谷川高士 (1992): '平面ひずみ試験の中間主応力に関する一考察', 第27回土質工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 693-694

木全卓,内田一徳,長谷川高士 (1992): '中間主応力係数を用いた平面ひずみ強度の推定',
平成4年度農業土木学会大会講演要旨集, pp. 252-253

木全卓,内田一徳,長谷川高士 (1993): 'K₀圧密カオリンの非排水繰返し載荷挙動',
第28回土質工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 1023-1026

木全卓,内田一徳,長谷川高士 (1993): 'K₀圧密粘土の非排水繰返し平面ひずみ・三軸挙
動の比較', 平成5年度農業土木学会大会講演要旨集, pp. 616-617

木全卓,内田一徳,長谷川高士 (1994): 'K₀過圧密カオリンの非排水繰返し載荷挙動',
第29回土質工学研究発表会講演集, Vol. 2, pp. 871-872

木全卓,内田一徳,長谷川高士 (1994): '過圧密粘土の平面ひずみ条件における非排水繰返
し破壊', 平成6年度農業土木学会大会講演要旨集, pp. 24-25

木全卓,内田一徳,長谷川高士 (1994): '粘土の非排水繰返し平面ひずみ挙動についての一
考察', 第51回農業土木学会京都支部研究発表会講演要旨集, pp. 174-175

付録

自動計測・自動制御プログラム例

本研究において作成したプログラムは行う実験の種類によって数多くあるが, すべてを
掲載するにはあまりにも膨大である。よってここでは, K₀圧密粘土の非排水静的せん断お
よび非排水繰返し載荷を行う場合を例に, 一連の主要プログラムのソースリストを示す。
なお, これらのプログラムを実行する際には, ハードウェアを直接制御するためにアセン
ブラで記述したプログラムなど, これ以外にもいくつかのサブ・プログラムが必要である。
個々のプログラムの詳細などについては第3章を参照されたい。

(1) メイン・プログラム

TESTIN : 試験開始用のプログラム

SEIPC : 粘土供試体をセットするためのプログラム

KNCNS : K₀圧密を行うためのプログラム

STSHR : 静的せん断を行うためのプログラム

KCCYC : 非排水繰返し載荷を行うためのプログラム

(2) サブルーチン・プログラム

PSZC : キャリブレーションを行うためのサブルーチン

PSKCN : K₀圧密制御を行うためのサブルーチン

PSSISH : 静的せん断制御を行うためのサブルーチン

PSSI TN : 静的せん断試験条件を設定するためのサブルーチン

PSSTOT : 静的せん断試験結果を出力するためのサブルーチン

PSDY : 非排水繰返し載荷制御を行うためのサブルーチン

PSDAAD : 非排水繰返し載荷の応力波形制御のためのサブルーチン

TESTIN.FOR

```

C *****
C * マイコン制御土質試験用リアルタイム制御・解析プログラム *
C * "TESTIN" Ver 1.0 Hasegawa Lab.( Kyoto Univ.) -- Sep. 1988 *
C *****
C * for Personal Computer : PC-9801 vm *
C * A/D Convertor : CANOPUS ANALOG-PRO DMA *
C * D/A Convertor : CONTEC DA12-4 (98) *
C *****
C * 土質試験データ入力・キャリブレーション用プログラム *
C * ----- 京都大学農学部農業工学科農業施設工学研究室 ----- *
C *****
C < 本プログラムの内容 >
C ① 試験データの入力
C ② A/D・D/Aの設定
C ③ 変換器のキャリブレーション
C *****
C
  DIMENSION CAL(7),VAL(7),VALC(7),VCAL(7),ZERO(7),VOLT(7)
  DIMENSION ZZZ(7),CNDL(2),CNLD(2)
  INTEGER KCH(7)
  CHARACTER VCH*9,FTTL(5)*6,FLNM(5)*2,FF*10,ATTL*6
  CHARACTER*4 TLCAL(7),UNIT(7),CTTL(2)
  CHARACTER*4 SOIL(2),TSDAY(2),TSMAN(2)
  CHARACTER*1 ANS,BEL(6),CH(9),AAA
  COMMON /BELL/ BEL
  COMMON /DA/ IDAO,IDA1
  DATA TLCAL/'DISP','AXLD','PSLD','PORE','SIG3',
1 'GAP1','GAP2'/
  DATA UNIT/' mm ',' kg ',' kg ',' kgcm ',' kgcm ',
1 ' mm ',' mm '/
  DATA CTTL/'圧密','膨潤'/
  DATA FTTL/'軸変位','軸荷重','枠荷重','間隙圧','セル圧'/

C
  DATA CNDL/37.7328,0.35830/
  DATA CNLD/40.6986,0.34625/
C ***** 上記パラメータ変更日 ----- 1991.02.12
C
1000 FORMAT(A1)
1020 FORMAT(A2)
1040 FORMAT(A4)
1080 FORMAT(2A4)
1100 FORMAT(7F10.0)

```

```

  WRITE(*,2140)
2140 FORMAT(' 実験室温 (A4) = '$)
  READ(*,1040) TEMP
  WRITE(*,2500) ATTL,SOIL,FLNM(2),FLNM(3),TSDAY,TSMAN,TEMP
  WRITE(6,2500) ATTL,SOIL,FLNM(2),FLNM(3),TSDAY,TSMAN,TEMP
2500 FORMAT(/1H0,'<<',A6,'試験データ>>'/
1 1H,10X,'試料名' =',2A4/
2 1H,10X,'供試体番号' =',2A2/
3 1H,10X,'試験日' =',2A4/
4 1H,10X,'試験者名' =',2A4/
5 1H,10X,'実験室温(℃)' =',A4/)
C *
C ***** ② A/D・D/Aの設定 *****
C *
20 WRITE(*,2600)
2600 FORMAT(1H0,'*** 各A/Dチャンネルの接続状況の確認 ***'/
1 1H,10X,' 0-CH <---> 軸変位'/
2 1H,10X,' 1-CH <---> 軸荷重'/
3 1H,10X,' 2-CH <---> 平面歪荷重'/
4 1H,10X,' 3-CH <---> 間隙水圧'/
5 1H,10X,' 4-CH <---> セル圧(σ3)'/
6 1H,10X,' 5-CH <---> キャップセンサ #1'/
7 1H,10X,' 6-CH <---> キャップセンサ #2'//
8 1H0,'*** ATTENTION PLEASE *** : '/
9 1H,10X,' 上記のように接続しましたか? ( Y or Else ) '$)
  READ(*,1000) ANS
  IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 20
  ICHN=0
  NCHN=5
  GO TO 40
30 WRITE(*,2700)
2700 FORMAT(1H0,' スタートチャンネル番号と総チャンネル数 (215)
1 ='$)
  READ(*,1200) ICHN,NCHN
40 WRITE(*,2800) ICHN,NCHN
2800 FORMAT(/,'*** A/Dサンプリングチャンネルの確認 ***'/
1 ,5X,' スタートチャンネル番号 =' ,13,' CH.'/
2 ,5X,' 総チャンネル数 =' ,13,' CHANNELS'/
3 1H0,'***** 上記の値を確認 ( Y or N ) '$)
  READ(*,1000) ANS
  IF(ANS.EQ.'Y'.OR.ANS.EQ.'y') GO TO 50
  IF(ANS.EQ.'N'.OR.ANS.EQ.'n') GO TO 30
  GO TO 40
C
C ***** D/Aチャンネル D/A-#0ch & #2ch の初期化

```

```

1200 FORMAT(14I5)
1650 FORMAT(/' 上記の値を確認 O.K. ? ( Y or Else ) '$)
C
  OPEN(6,FILE='PRN:')
C
  DO 5 I=1,6,3
  BEL(1)=CHAR(7)
  BEL(1+1)=CHAR(0)
5 BEL(1+2)=CHAR(8)
C
C ***** クロックスタート
  CALL CLOCK(1,TINT)
C *
C ***** ① 試験データの入力 *****
C *
  FLNM(1)='B:'
10 WRITE(*,2000)
2000 FORMAT(' 試験の種類 ①:三 軸,②:平面歪 = '$)
  READ(*,1200) ITP1
  ATTL=' '
  IF(ITP1.EQ.1) ATTL='三 軸'
  IF(ITP1.EQ.2) ATTL='平面歪'
  IF(ATTL.EQ.' ') GO TO 10
  WRITE(*,2050)
2050 FORMAT(' 試料の種類 ①:粘性土,②:砂質土 = '$)
  READ(*,1200) ITP2
  FLNM(2)=' '
  IF(ITP1.EQ.1.AND.ITP2.EQ.1) FLNM(2)='TC'
  IF(ITP1.EQ.1.AND.ITP2.EQ.2) FLNM(2)='TS'
  IF(ITP1.EQ.2.AND.ITP2.EQ.1) FLNM(2)='PC'
  IF(ITP1.EQ.2.AND.ITP2.EQ.2) FLNM(2)='PS'
  IF(FLNM(2).EQ.' ') GO TO 10
C
  WRITE(*,2100)
2100 FORMAT(' 試料名 (2A4) = '$)
  READ(*,1080) SOIL
  WRITE(*,2110)
2110 FORMAT(' 供試体番号(A2) = '$)
  READ(*,1020) FLNM(3)
  WRITE(*,2120)
2120 FORMAT(' 試験日 (2A4,DD-MM-YY) = '$)
  READ(*,1080) TSDAY
  WRITE(*,2130)
2130 FORMAT(' 試験者名 (2A4) = '$)
  READ(*,1080) TSMAN
50 WRITE(*,3000)
3000 FORMAT(/,' ***** D/A-#0 & 2 の初期化 *****'//
1 ' D/A-#0 (初期値) = '$)
  READ(*,1200) IDAO
  WRITE(*,3010)
3010 FORMAT(' D/A-#2 (初期値) = '$)
  READ(*,1200) IDA1
  IDAO=IDA0-1
  IDA1=IDA1-1
  CALL DASUB1(IDAO,0)
  CALL DASUB1(IDA1,1)
  WRITE(*,3020) IDAO,IDA1
3020 FORMAT(/,' *** D/Aの初期値(Digit) ***'/
1 5X,' D/A-#0 : ',17,' Digit'/
2 5X,' D/A-#2 : ',17,' Digit'/)
  WRITE(*,1650)
  READ(*,1000) ANS
  IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 50
  WRITE(6,3020) IDAO,IDA1
C *
C ***** ③ 変換器のキャリブレーション *****
C *
C * (軸変位,軸荷重,平面歪荷重,間隙水圧,側圧の較正值の入力)
C
  CALL PSZC(1CHN,NCHN,ZERO,VALC,VCAL,CAL,TLCAL,UNIT,NKC,KCH)
C
C ***** 外部ファイル書き出し
  NTL=9
  FLNM(4)='DT'
  WRITE(FF,'(A2,A2,A2,A2)') FLNM(1),FLNM(2),FLNM(3),FLNM(4)
  OPEN(NTL,FILE=FF,STATUS='NEW',FORM='UNFORMATTED')
C
  WRITE(NTL) SOIL,FLNM(3),TSDAY,TSMAN,TEMP
  WRITE(NTL) ICHN,NCHN
  WRITE(NTL) IDAO,IDA1,CNDL(1),CNDL(2),CNLD(1),CNLD(2)
  WRITE(NTL) VCAL(1),VCAL(2),VCAL(3),VCAL(4),VCAL(5),
1 VCAL(6),VCAL(7)
  WRITE(NTL) ZERO(1),ZERO(2),ZERO(3),ZERO(4),ZERO(5),
1 ZERO(6),ZERO(7)
C
  STOP
  END

```


SETPC.FOR

```

C *****
C * マイコン制御土質試験用リアルタイム制御・解析プログラム *
C * "SETPC":Ver 1.0 Hasegawa Lab.( Kyoto Univ.) --- Jan. 1991 *
C *****
C * for Personal Computer : PC-9801 vm *
C * A/D Convertor : CANOPUS ANALOG-PRO DMA *
C * D/A Convertor : CONTEC DA12-4 (98) *
C *****
C * 平面歪試験供試体(粘性土)セット・(真空)飽和化用プログラム *
C * ----- 京都大学農学部農業工学科農業施設工学研究室 ----- *
C *****
C < 本プログラムの内容 >
C ① 供試体のセット・寸法測定
C ② セルのセット・注水
C ③ 供試体の真空(負圧)飽和化
C ④ 背圧載荷(放置)飽和化
C ⑤ B値測定
C *****
C
      DIMENSION VAL(7),VCAL(7),ZERO(7),VOLT(7),CNLD(2),CNLD(2)
      INTEGER KCH(7)
      CHARACTER VCH*9,FTTL(5)*6,FLNM(5)*2,FF*10
      CHARACTER*4 SOIL(2),TSDAY(2),TSMAN(2),TEMP
      CHARACTER*1 ANS,BEL(6),CH(9),AAA
      COMMON /BELL/ BEL
      COMMON /DA/ IDAO,IDA1
      DATA FTTL/'軸変位','軸荷重','枠荷重','間隙圧','セル圧'/
C
1000 FORMAT(A1)
1020 FORMAT(A2)
1040 FORMAT(A4)
1080 FORMAT(2A4)
1100 FORMAT(7F10.0)
1650 FORMAT(/' 上記の値を確認 O.K. ? ( Y or Else ) '$)
1700 FORMAT(/' 値の確認(' ,A6,' ) : ' ,F10.5,' ( Y or N ) '$)
C
      DO 5 I=1,6,3
      BEL(I)=CHAR(7)
      BEL(I+1)=CHAR(0)
5      BEL(I+2)=CHAR(8)
C
C ***** 外部ファイル読み込み

```

```

C
      FLNM(1)='B:'
      FLNM(4)='DT'
10 WRITE(*,2000)
2000 FORMAT(' 供試体種別の入力 (A2) = '$)
      READ(*,1020) FLNM(2)
      WRITE(*,2010)
2010 FORMAT(' 供試体番号の入力 (A2) = '$)
      READ(*,1020) FLNM(3)
      WRITE(*,2020) FLNM(2),FLNM(3)
2020 FORMAT(' データファイル名は <' ,2A2,'> ? ( Y or N ) '$)
      READ(*,1000) ANS
      IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 10
      WRITE(FF,'(A2,A2,A2,A2)') FLNM(1),FLNM(2),FLNM(3),FLNM(4)
      OPEN(8,FILE=FF,STATUS='OLD',FORM='UNFORMATTED')
      READ(8) SOIL,FLNM(3),TSDAY,TSMAN,TEMP
      READ(8) ICHN,NCHN
      READ(8) IDAO,IDA1,CNLD(1),CNLD(2),CNLD(1),CNLD(2)
      READ(8) VCAL(1),VCAL(2),VCAL(3),VCAL(4),VCAL(5),
      VCAL(6),VCAL(7)
      READ(8) ZERO(1),ZERO(2),ZERO(3),ZERO(4),ZERO(5),
      ZERO(6),ZERO(7)
C
      OPEN(6,FILE='PRN:')
      NTL=9
C
      WRITE(6,2050)
2050 FORMAT(1H,' ***** Program < SETPC > *****'/)
C
C ***** クロックスタート
      CALL CLOCK(1,TINT)
C *
C ***** ① 供試体のセット・寸法測定 *****
C *
12 WRITE(*,2100)
2100 FORMAT(/' 油圧ポンプ始動'/
      ' ゼロ点を取り直しますか? ( Y or N ) '$)
      READ(*,1000) ANS
      IF(ANS.EQ.'N'.OR.ANS.EQ.'n') GO TO 14
      IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 12
      WRITE(6,2110)
2110 FORMAT(1H,'/' ***** ゼロ点の取り直し *****'/)
      CALL SGLAD(0,1,ICHN,NCHN,ZERO)
C
14 ZRP=ZERO(1)

```

```

15 WRITE(*,2120)
2120 FORMAT(/' ベDESTALとキャップ間距離測定 (cm) = '$)
      READ(*,1100) HIGHTO
      CALL SGLAD(1,0,0,1,ZERO)
      WRITE(*,2130) HIGHTO,ZRP,ZERO(1)
2130 FORMAT(1H,'/' ベDESTAL & キャップ 間の初期距離(測定) = '
      1 ,F8.3,' (cm)'/
      2 1H,' 軸変位のゼロ点:' ,F8.4,' (V) → ' ,F8.4,' (V)'/)
      WRITE(*,1650)
      READ(*,1000) ANS
      IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 15
      WRITE(6,2130) HIGHTO,ZRP,ZERO(1)
C
16 WRITE(*,2140)
2140 FORMAT(/' ***** 供試体のセット。 *****'/)
      1 ' ベDESTALの上昇 → 自動制御 ? ( Y or N ) '$)
      READ(*,1000) ANS
      WRITE(*,2150)
2150 FORMAT(' ベDESTAL接触時の荷重値 (kgf) = '$)
      READ(*,1100) CNLOAD
      IF(ANS.EQ.'Y'.OR.ANS.EQ.'y') GO TO 18
      IF(ANS.EQ.'N'.OR.ANS.EQ.'n') GO TO 20
      GO TO 18
18 ICNT=1
      WRITE(*,2160)
2160 FORMAT(' ***** D/A による自動制御 *****'/)
      GO TO 22
20 ICNT=0
      WRITE(*,2170)
2170 FORMAT(' ***** マニュアル制御 *****'/)
22 IF(ICNT.EQ.1) CALL DACTRL(0,1,0.5)
      CALL SGLAD(1,0,1,1,VOLT)
      AXLD=(VOLT(2)-ZERO(2))*VCAL(2)
      WRITE(*,2180) CNLOAD,AXLD
2180 FORMAT(/' ***** ベDESTAL上昇中 → 目標値 = '
      1 ,F6.2,' (kgf) 測定値 = ' ,F6.2,' (kgf)'/)
      IF(AXLD.LT.CNLOAD-0.02) GO TO 22
      CALL OUTSTR(BEL,3)
      WRITE(*,2190)
2190 FORMAT(/' ベDESTAL上昇の制御完了'/)
      1 ' ゴムスリブをキャップに固定する。'/)
24 CALL SGLAD(1,0,1,1,VOLT)
      AXLD=(VOLT(2)-ZERO(2))*VCAL(2)
      WRITE(*,1700) FTTL(2),AXLD
      READ(*,1000) ANS

```

```

      IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 24
C
C ***** 供試体初期データのサンプリング・入力
      WRITE(*,2200)
      WRITE(6,2200)
2200 FORMAT(1H,' ***** 初期拘束圧の載荷(負圧) *****'/
      1 1H,' (供試体初期データ・サンプリング)'/)
C
      WRITE(*,2220)
2220 FORMAT(/' 拘束圧(負圧)の調整開始'/
      1 ' 供試体に初期拘束圧 0.05 kgf/cm2 を載荷する'/
      2 ' (軸荷重の大きさに注意→ゼロに保つ)'/)
28 CALL SGLAD(1,0,3,1,VOLT)
      CALL SGLAD(1,0,1,1,VOLT)
      PORE=(VOLT(4)-ZERO(4))*VCAL(4)
      AXLD=(VOLT(2)-ZERO(2))*VCAL(2)
      WRITE(*,2240) PORE,AXLD
2240 FORMAT(' 間隙圧 = ' ,F7.3,' (kgf/cm2) : '
      1 ' 軸荷重 = ' ,F7.3,' (kgf) → O.K. ? ( Y or N ) '$)
      READ(*,1000) ANS
      IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 28
C
30 WRITE(*,2260)
2260 FORMAT(/' *** 供試体の測定結果の入力 ***'/)
      WRITE(*,2270)
2270 FORMAT(/5X,' 供試体の高さ (H:cm) = '$)
      READ(*,1100) HIGHT
      WRITE(*,2280)
2280 FORMAT(/5X,' 供試体の幅 (W:cm) = '$)
      READ(*,1100) WIDTH
      WRITE(*,2290)
2290 FORMAT(/5X,' 供試体の奥行 (D:cm) = '$)
      READ(*,1100) DEPTH
      AREA0=DEPTH*WIDTH
      AREAPO=HIGHT*DEPTH
      VOLSP=HIGHT*AREA0
      WRITE(*,1650)
      READ(*,1000) ANS
      IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 30
C
      CALL ZERCAL('固定',ICHN,NCHN,VOLT,NKC,KCH)
      DH=(VOLT(1)-ZERO(1))*VCAL(1)*0.1
      ZERO(1)=VOLT(1)
      CALL EK120A(CH)
      VCH=CH(1:9)

```



```

      READ(VCH, '(F9.2)') DRAIN0
C
      CALL PSCLSG(ICHN, NCHN, VOLT, VAL, ZERO, VVAL, HIGHT, WIDTH,
1 VOLSP, AREA1, DRAIN0, SG1, SG2, SG3, 1, 0, 0)
      HIGHTO=HIGHT+DH
      WRITE(*, 2300) HIGHTO
      WRITE(6, 2300) HIGHTO
2300 FORMAT(1H, ' ベテスタ & キャップ 間の初期距離'
1 ' (逆算) = ', F8.3, '(cm)')
      WRITE(*, 2320) DH, HIGHT, WIDTH, DEPTH, AREA0, AREAPO, VOLSP
2320 FORMAT(1H, ' ***** 供試体初期データ *****'
1 1H, 10X, '偏差' = ', F10.5, ' cm' /
2 1H, 10X, '高さ (H) = ', F10.5, ' cm' /
3 1H, 10X, '幅 (W) = ', F10.5, ' cm' /
4 1H, 10X, '奥行 (D) = ', F10.5, ' cm' /
5 1H, 10X, '面積 (W*D) = ', F10.5, ' cm2' /
6 1H, 10X, '面積 (H*D) = ', F10.5, ' cm2' /
7 1H, 10X, '体積' = ', F10.5, ' cm3' /
      WRITE(*, 1650)
      READ(*, 1000) ANS
      IF(ANS.NE. 'Y'.AND.ANS.NE. 'y') GO TO 30
      WRITE(6, 2320) DH, HIGHT, WIDTH, DEPTH, AREA0, AREAPO, VOLSP
C
32 WRITE(*, 2330)
2330 FORMAT(/' *** 最終圧密圧力 (負圧) のセット ***'
1 ' 最終負圧の指定 ( kgf/cm2 ) = '$)
      READ(*, 1100) ESG3
      WRITE(*, 1650)
      READ(*, 1000) ANS
      IF(ANS.NE. 'Y'.AND.ANS.NE. 'y') GO TO 32
      ESG3=ABS(ESG3)
      WRITE(*, 2335) ESG3
2335 FORMAT(1H, ' 負圧による初期等方圧密'
1 1H, ' (圧密圧力 : ', F5.2, ' (kgf/cm2)) ' /)
C
      WRITE(*, 2220)
33 CALL SNGLAD(1, 0, 3, 1, VOLT)
      CALL SNGLAD(1, 0, 1, 1, VOLT)
      PORE=(VOLT(4)-ZERO(4))*VCAL(4)
      AXLD=(VOLT(2)-ZERO(2))*VCAL(2)
      WRITE(*, 2240) PORE, AXLD
      READ(*, 1000) ANS
      IF(ANS.NE. 'Y'.AND.ANS.NE. 'y') GO TO 33
C
34 WRITE(*, 2340)

```

```

2340 FORMAT(/' 最終負圧載荷終了' /
1 ' (軸ひずみの変化が落ち着くまで放置する) ' /)
      CALL PSCLSG(ICHN, NCHN, VOLT, VAL, ZERO, VVAL, HIGHT, WIDTH,
1 VOLSP, AREA, DRAIN0, SG1, SG2, SG3, 1, 0, 0)
      WRITE(*, 1650)
      READ(*, 1000) ANS
      IF(ANS.NE. 'Y'.AND.ANS.NE. 'y') GO TO 34
C
      HGHT=HIGHT-VAL(1)*0.1
      DH=HIGHT-HGHT
      EPS1=DH/HIGHT
      WOTH=WIDTH*(1-EPS1)
      DPTH=DEPTH*(1-EPS1)
      VLSP=HGHT*WOTH*DPTH
      DV=VOLSP-VLSP
      EPSV=DV/VOLSP
      PPP=(SG1+SG2+SG3)/3.0
      QQQ=SG1-SG3
      PE1=EPS1*100.
      PEV=EPSV*100.
      WRITE(*, 2350) ESG3, HGHT, WOTH, DPTH, VLSP, EPS1, EPSV
2350 FORMAT(/1H, ' *** 初期等方圧密後の供試体データ ***'
1 1H, ' 有効拘束圧 σ3 : ', F8.5, ' (kgf/cm2)' /
2 1H, ' 高さ : ', F8.5, ' (cm)' /
3 1H, ' 幅 : ', F8.5, ' (cm)' /
4 1H, ' 奥行 : ', F8.5, ' (cm)' /
5 1H, ' 体積 : ', F8.3, ' (cm3)' /
6 1H, ' ε1 : ', F8.5, ' (%)' /
7 1H, ' εv : ', F8.5, ' (%)' /)
      WRITE(*, 1650)
      READ(*, 1000) ANS
      IF(ANS.NE. 'Y'.AND.ANS.NE. 'y') GO TO 34
      WRITE(6, 2350) ESG3, HGHT, WOTH, DPTH, VLSP, EPS1, EPSV
C
      ZERO1=ZERO(1)
      ZERO3=ZERO(3)
36 WRITE(*, 2370)
2370 FORMAT(/' 軸変位・平面歪荷重のゼロ点の取り直し' /
1 ' 拘束棒に平面歪荷重計を取り付ける' /
2 ' ( Hit Return , Start Sampling ! ) '$)
      READ(*, 1000) AAA
      CALL SNGLAD(1, 0, 0, 1, ZERO)
      CALL SNGLAD(1, 0, 2, 1, ZERO)
      WRITE(*, 2380) ZERO1, ZERO(1), ZERO3, ZERO(3)
2380 FORMAT(1H, '//' 軸変位・平面歪荷重のゼロ点の取り直し' /

```

```

1 1H, '軸 変 位のゼロ点 : ', F8.4, '(V) → ', F8.4, '(V)' /
2 1H, '平面歪荷重のゼロ点 : ', F8.4, '(V) → ', F8.4, '(V)' /
      WRITE(*, 1650)
      READ(*, 1000) ANS
      IF(ANS.NE. 'Y'.AND.ANS.NE. 'y') GO TO 36
      WRITE(6, 2380) ZERO1, ZERO(1), ZERO3, ZERO(3)
      CALL PSCLSG(ICHN, NCHN, VOLT, VAL, ZERO, VVAL, HIGHT, WIDTH,
1 VOLSP, AREA, DRAIN0, SG1, SG2, SG3, 0, 0, 0)
C
      WRITE(*, 2390)
2390 FORMAT(/' 拘束棒のセット' /
1 ' 拘束棒荷重値のチェック ( Hit Return ) '$)
      READ(*, 1000) AAA
38 CALL SNGLAD(1, 0, 2, 1, VOLT)
      PSLD=(VOLT(3)-ZERO(3))*VCAL(3)
      WRITE(*, 1700) FTTL(3), PSLD
      READ(*, 1000) ANS
      IF(ANS.NE. 'Y'.AND.ANS.NE. 'y') GO TO 38
C
      WRITE(*, 2400)
      WRITE(6, 2400)
2400 FORMAT(/1H, ' ***** セルのセット・供試体の飽和化 *****'
      WRITE(*, 2410) IDAO, IDA1
      WRITE(6, 2410) IDAO, IDA1
2410 FORMAT(/' D/A出力数 (整数: digit) ' /
1 ' CH#-0 = ', 17, ' : CH#-1 = ', 17, /)
C *
C ***** ② セルのセット・注水 *****
C *
      ZERO5=ZERO(5)
40 WRITE(*, 2420)
2420 FORMAT(/' ***** セル注水 *****' /
1 ' セル圧のゼロ点の取り直し (供試体中央) '
2 ' ( Hit Return , Start Sampling ! ) '$)
      READ(*, 1000) AAA
      CALL SNGLAD(1, 0, 4, 1, ZERO)
      WRITE(*, 2430) ZERO5, ZERO(5)
2430 FORMAT(1H, '//' セル圧のゼロ点取り直し' /
1 1H, ' セル圧のゼロ点 : ', F8.4, '(V) → ', F8.4, '(V)' /)
      WRITE(*, 1650)
      READ(*, 1000) ANS
      IF(ANS.NE. 'Y'.AND.ANS.NE. 'y') GO TO 40
      WRITE(6, 2430) ZERO5, ZERO(5)
C
      WRITE(*, 2440)

```

```

2440 FORMAT(/' セル注水を完了する (ロードセルが浸るまで) ' /
1 ' ( Hit Return , Control Start ! ) '$)
      READ(*, 1000) AAA
42 WRITE(*, 2450)
2450 FORMAT(/' キャップ部の浮力による荷重増分 ( gf ) = '$)
      READ(*, 1100) CAPW
      DMV2=CAPW/VCAL(2)
      ZERO2=ZERO(2)+DMV2/1000.
      CALL SNGLAD(1, 0, 1, 1, VOLT)
      AXLD=(VOLT(2)-ZERO2)*VCAL(2)
      WRITE(*, 2460) CAPW, DMV2, ZERO2, AXLD
2460 FORMAT(1H, '//' キャップの自重によるゼロ点補正結果' /
1 1H, '6X'補正重量 = ', F8.4, ' g' /
2 1H, '6X'ゼロ点移動量 = ', F8.4, ' mV' /
3 1H, '6X'ゼロ点 = ', F8.4, ' V' /
4 1H, '6X'現在の軸荷重 = ', F8.4, ' kgf' /)
      WRITE(*, 1650)
      READ(*, 1000) ANS
      IF(ANS.NE. 'Y'.AND.ANS.NE. 'y') GO TO 42
      WRITE(6, 2460) CAPW, DMV2, ZERO2, AXLD
      ZERO(2)=ZERO2
C
      WRITE(*, 2470)
2470 FORMAT(/' 軸圧制御モードを荷重制御に変更' /)
44 CALL SNGLAD(1, 0, 1, 1, VOLT)
      AXLD=(VOLT(2)-ZERO(2))*VCAL(2)
      WRITE(*, 1700) FTTL(2), AXLD
      READ(*, 1000) ANS
      IF(ANS.NE. 'Y'.AND.ANS.NE. 'y') GO TO 44
      CD=CNLD(1)-CNLD(2)*FLOAT(IDAO)
      WRITE(*, 2480) IDAO, CD
2480 FORMAT(/' << 制御モード変更 (変位制御→荷重制御) >>' /
1 10X, 'D A - 0 c h の出力数 (整数: d) = ', 17, /
2 10X, '制御信号の値 (mV) = ', F10.3, /)
      WRITE(6, 2490) IDAO
2490 FORMAT(/' 制御モード変更 (DA-0ch 出力数) = ', 17, ' Digit' /)
C
46 CALL PSCLSG(ICHN, NCHN, VOLT, VAL, ZERO, VVAL, HIGHT, WIDTH,
1 VOLSP, AREA, DRAIN0, SG1, SG2, SG3, 1, 0, 0)
      WRITE(*, 1650)
      READ(*, 1000) ANS
      IF(ANS.NE. 'Y'.AND.ANS.NE. 'y') GO TO 46
C *
C ***** ③ 供試体の真空 (負圧) 飽和化 *****
C *

```



```

WRITE(*,2500)
WRITE(6,2500)
2500 FORMAT(/1H,' ***** 供試体の負圧飽和過程 *****'//
1 ' 負圧用レギュレータシステム・脱気水タンクを接続'//)
52 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,1,0,0)
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 52
C
WRITE(*,2510)
2510 FORMAT(/' 有効拘束圧を保持したまま間隙水圧を '
1 ' -0.95 kgf/cm2 まで下げる'//
2 ' 方法：セル圧から交互に -0.05 kgf/cm2 ずつ'//
3 ' (セル圧サーボのコントロールレベルに注意！)'//)
54 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,0,0,0)
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 54
CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,1,0,0)
WRITE(*,2520)
2520 FORMAT(/' セル圧を 0 kgf/cm2 まで戻す'//
1 ' (間隙水圧から交互に +0.05 kgf/cm2 ずつ)'//)
56 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,0,0,0)
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 56
C
WRITE(*,2530)
WRITE(6,2530)
2530 FORMAT(/1H,' ***** 負圧 (間隙水圧) の側圧置換 *****'//
1 1H,' (モデル 14 のバイアス調整による)'//)
58 CALL SNGLAD(1,0,4,1,VOLT)
SIG3=(VOLT(5)-ZERO(5))*VCAL(5)
WRITE(*,1700) FTTL(5),SIG3
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 58
C
WRITE(*,2540)
2540 FORMAT(/' 脱気水タンクの水頭差によるフラッシング'//
1 ' (水頭差 20~30 cm で約 1 時間)'//)
60 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,

```

```

1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,1,0,0)
WRITE(*,2550)
2550 FORMAT(' フラッシング終了？ ( Y or N ) '$)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 60
C
CALL EK120A(CH)
VCH=CH(1:9)
READ(VCH,'(F9.2)') DRAIN10
C *
C ***** ④ 背圧載荷 (放置) 飽和化 *****
C *
ZERO4=ZERO(4)
62 WRITE(*,2560)
2560 FORMAT(/' 間隙水圧 (電子天秤) のゼロ点の取り直し'//
1 ' (脱気水側のバルブを閉じ、電子天秤側を開ける)'//
2 ' ( Hit Return , Start Sampling ! ) '$)
READ(*,1000) AAA
CALL SNGLAD(1,0,3,1,ZERO)
WRITE(*,2570) ZERO4,ZERO(4)
2570 FORMAT(1H,'/' 間隙水圧のゼロ点の取り直し'//
1 1H,' 間隙水圧のゼロ点：',F8.4,'(V) → ',F8.4,'(V)'//)
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 62
WRITE(6,2570) ZERO4,ZERO(4)
CALL EK120A(CH)
VCH=CH(1:9)
READ(VCH,'(F9.2)') DRAIN11
DRAIN0=DRAIN0+DRAIN11-DRAIN10
CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,1,0,0)
C
WRITE(*,2600)
WRITE(6,2600)
2600 FORMAT(/1H,' ***** 背圧 (バックプレッシャー) 載荷 *****'//
1 1H,' バイアス・リレー (モデル 14) による制御'//)
64 WRITE(*,2610)
2610 FORMAT(/' 最終背圧の大きさを指定 (kgf/cm2) = '$)
READ(*,1100) BKP
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 64
WRITE(*,2620)
2620 FORMAT(/' 背圧用レギュレータをゆっくり増加させる'//

```

```

1 ' ( Hit Return Key , Control Start ) '$)
READ(*,1000) AAA
C
66 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,0,5,0)
IF(VAL(4).GE.BKP-0.01) GO TO 68
IF(VAL(5).GE.BKP+ESG3-0.01) GO TO 68
GO TO 66
C
68 CALL OUTSTR(BEL,3)
WRITE(*,2630)
2630 FORMAT(/' 背圧載荷終了？ ( Y or N ) '$)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 66
CALL EK120A(CH)
VCH=CH(1:9)
READ(VCH,'(F9.2)') DRAIN12
DRAIN0=DRAIN0+DRAIN12-DRAIN11
70 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,1,0,0)
C
WRITE(*,2640)
2640 FORMAT(/' バルブを開けて 1~2 時間放置する'//
1 ' 放置完了 (電子天秤の値が落ち着いたか) ? '
2 ' ( Y or Else ) '$)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 70
C *
C ***** ⑤ B 値測定 *****
C *
WRITE(*,2700)
2700 FORMAT(/' B 値測定 (セル圧減少→増加による)'//
1 ' !!! 供試体の非排水条件の確認 !!!'//
2 ' 初期セル圧・間隙水圧のサンプリング'//
3 ' ( Hit Return , Start Sampling ! ) '$)
READ(*,1000) AAA
CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,0,0,0)
POR1=VAL(4)
CEL1=VAL(5)
WRITE(*,2710)
2710 FORMAT(/' セル圧を 0.1 kgf/cm2 だけ下げる'//
1 ' セル圧・間隙水圧のサンプリング'//
2 ' ( Hit Return , Start Sampling ! ) '$)
READ(*,1000) AAA

```

```

72 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,0,0,0)
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 72
POR2=VAL(4)
CEL2=VAL(5)
WRITE(*,2720)
2720 FORMAT(/' セル圧を元に戻す'//
1 ' セル圧・間隙水圧のサンプリング'//
2 ' ( Hit Return , Start Sampling ! ) '$)
READ(*,1000) AAA
74 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,0,0,0)
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 74
POR3=VAL(4)
CEL3=VAL(5)
C
BVAL1=(POR1-POR2)/(CEL1-CEL2)
BVAL2=(POR3-POR2)/(CEL3-CEL2)
BVAL0=(POR1+POR3-2.0*POR2)/(CEL1+CEL3-2.0*CEL2)
76 WRITE(*,2730) BVAL0,BVAL1,BVAL2
2730 FORMAT(1H,'/' ***** B 値の測定結果 *****'//
1 1H,' B 値 = ',F7.4,/'
2 1H,' (減圧時 = ',F7.4,' ; 加圧時 = ',F7.4,')'//)
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.EQ.'N'.OR.ANS.EQ.'n') GO TO 70
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 76
WRITE(6,2730) BVAL0,BVAL1,BVAL2
C
WRITE(*,2740)
2740 FORMAT(' セル圧・間隙水圧の調整後'//
1 ' 電子天秤のゼロ点取り直しを行う'//)
78 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,1,0,0)
WRITE(*,2750)
2750 FORMAT(/' 電子天秤のゼロ点の取り直し ( Y or Else ) '$)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 78
CALL EK120A(CH)
VCH=CH(1:9)
READ(VCH,'(F9.2)') DRAIN0

```



```

WRITE(*,2760) DRAIN0,VOLSP
2760 FORMAT(1H,/' 電子天秤の0レベル = ',F7.2,' g'/
1 1H,/' 供試体の体積 = ',F7.2,' cm3'//)
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 78
WRITE(6,2760) DRAIN0,VOLSP
C
90 WRITE(*,2800) IDAO,IDA1
WRITE(6,2800) IDAO,IDA1
2800 FORMAT(1H,/' 現在のD/Aの値 D/A-0ch : ',15,
1 ' digit , D/A-1ch : ',15,' digit'//)
C *
C ***** 外部ファイル書き出し *****
C *
CLOSE(8,STATUS='DELETE')
OPEN(NTL,FILE=FF,STATUS='NEW',FORM='UNFORMATTED')
WRITE(NTL) SOIL,FLNM(3),TSDAY,TSMAN,TEMP
WRITE(NTL) ICHN,NCHN
WRITE(NTL) IDAO,IDA1,CNDL(1),CNDL(2),CNLD(1),CNLD(2)
WRITE(NTL) VCAL(1),VCAL(2),VCAL(3),VCAL(4),VCAL(5),
1 VCAL(6),VCAL(7),
WRITE(NTL) ZERO(1),ZERO(2),ZERO(3),ZERO(4),ZERO(5),
1 ZERO(6),ZERO(7),
WRITE(NTL) HIGHT,WIDTH,DEPTH,VOLSP,DRAIN0,BKP
C
STOP
END

```

KNCONS.FOR

```

C *****
C * マイコン制御土質試験用リアルタイム制御・解析プログラム *
C * "KNCONS":Ver1.0 Hasegawa Lab.( Kyoto Univ.) --- Jan. 1991 *
C *****
C * for Presonal Computer : PC-9801 vm *
C * A/D Convertor : CANOPUS ANALOG-PRO DMA *
C * D/A Convertor : CONTEC DA12-4 (98) *
C *****
C * Ko-圧密制御・解析プログラム (荷重制御モード) *
C * - - - - 京都大学農学部農業工学科農業施設工学研究室 - - - - *
C *****
C < 本プログラムの内容 >

```

```

1 ZERO(6),ZERO(7)
READ(8) HIGHT,WIDTH,DEPTH,VOLSP,DRAIN0,BKP
CLOSE(8)
C
OPEN(6,FILE='PRN:')
NTL=10
WRITE(6,2050)
2050 FORMAT(1H1,/' ***** Program < KNCONS > *****'//)
FLNM(4)='KN'
WRITE(FFF,/'(A2,A2,A2,A2)') FLNM(1),FLNM(2),FLNM(3),FLNM(4)
OPEN(NTL,FILE=FFF,STATUS='NEW',FORM='UNFORMATTED')
C
C ***** クロックスタート
CALL CLOCK(1,TINT)
C
WRITE(*,2060)
2060 FORMAT(' 現在のD/Aの値の入力'//
1 ' D/A-0ch & 2ch : (217) = '$)
READ(*,1210) IDAO,IDA1
C *
C ***** ① 制御モード変更 (荷重制御へ) *****
C *
WRITE(*,2070)
2070 FORMAT(' 軸圧制御モードを荷重制御に変えます。'//)
40 CALL SNGLAD(1,0,1,1,VOLT)
AXLD=(VOLT(2)-ZERO(2))*VCAL(2)
WRITE(*,1700) FTTL(2),AXLD
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 40
CD=CNLD(1)-CNLD(2)*FLOAT(IDAO)
WRITE(*,2080) IDAO,CD
2080 FORMAT(' << 制御モードを変位制御から荷重制御に変更 >>'//
1 10X,' D A - 0 c h の出力数 (整数: d) = ',17/
2 10X,' 制御信号の値 (mV) = ',F10.3//)
WRITE(6,2090) IDAO
2090 FORMAT(' 制御モード変更 (DA-0ch 出力数) = ',17,' Digit'//)
C
50 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,1,0,0)
WRITE(*,1500)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 50
C *
C ***** ② Ko-圧密プログラム (制御・計算) *****
C *

```

```

C ① 荷重制御切替え
C ② Ko圧密制御プログラムの呼び出し
C *****
C
DIMENSION VAL(7),VCAL(7),ZERO(7),VOLT(7),CNDL(2),CNLD(2)
CHARACTER VCH*9,FTTL(5)*6,FLNM(5)*2,FF*10,FFF*10
CHARACTER*4 SOIL(2),TSDAY(2),TSMAN(2),TEMP
CHARACTER*1 ANS,BEL(6),CH(9),AAA
COMMON /BELL/ BEL
COMMON /DA/ IDAO,IDA1
DATA FTTL/'軸変位','軸荷重','枠荷重','間隙圧','セル圧'/
C
1000 FORMAT(A1)
1020 FORMAT(A2)
1210 FORMAT(7I7)
1500 FORMAT(' 上記の値を確認 ( Y or N ) ? : '$)
1700 FORMAT(' 値の確認 (',A6,') : ',F10.5,' ( Y or N ) '$)
C
DO 5 I=1,6,3
BEL(1)=CHAR(7)
BEL(1+1)=CHAR(0)
5 BEL(1+2)=CHAR(8)
C
C ***** 外部ファイル読み込み
C
FLNM(1)='B:'
FLNM(4)='DT'
10 WRITE(*,2000)
2000 FORMAT(' 供試体種別の入力 (A2) = '$)
READ(*,1020) FLNM(2)
WRITE(*,2010)
2010 FORMAT(' 供試体番号の入力 (A2) = '$)
READ(*,1020) FLNM(3)
WRITE(*,2020) FLNM(2),FLNM(3)
2020 FORMAT(' データファイル名は <',2A2,'> ? ( Y or N ) '$)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 10
WRITE(FF,/'(A2,A2,A2,A2)') FLNM(1),FLNM(2),FLNM(3),FLNM(4)
OPEN(8,FILE=FF,STATUS='OLD',FORM='UNFORMATTED')
READ(8) SOIL,FLNM(3),TSDAY,TSMAN,TEMP
READ(8) ICHN,NCHN
READ(8) IDAO,IDA1,CNDL(1),CNDL(2),CNLD(1),CNLD(2)
READ(8) VCAL(1),VCAL(2),VCAL(3),VCAL(4),VCAL(5),
1 VCAL(6),VCAL(7)
READ(8) ZERO(1),ZERO(2),ZERO(3),ZERO(4),ZERO(5),

```

```

CALL PSKNCN(ICHN,NCHN,VCAL,ZERO,VAL,HIGHT,WIDTH,VOLSP,
1 DRAIN0,NTL)

```

```

C
WRITE(*,2100) IDAO,IDA1
WRITE(6,2100) IDAO,IDA1
2100 FORMAT(1H,/' 現在のD/Aの値 D/A-0ch : ',15,
1 ' digit , D/A-2ch : ',15,' digit'//)
C
CLOSE(NTL)
C
STOP
END

```

STSHR.FOR

```

C *****
C * マイコン制御土質試験用リアルタイム制御・解析プログラム *
C * "STSHR" Ver 1.0 Hasegawa Lab.( Kyoto Univ.) --- Sep. 1988 *
C *****
C * for Presonal Computer : PC-9801 vm *
C * A/D Convertor : CANOPUS ANALOG-PRO DMA *
C * D/A Convertor : CONTEC DA12-4 (98) *
C *****
C * 静的せん断制御・解析プログラム *
C * - - - - 京都大学農学部農業工学科農業施設工学研究室 - - - - *
C *****
C < 本プログラムの内容 >
C ① 変位制御切替え
C ② 静的せん断制御プログラムの呼び出し
C *****
C
DIMENSION VAL(7),VCAL(7),ZERO(7),VOLT(7),CNDL(2),CNLD(2)
INTEGER KCH(7)
CHARACTER VCH*9,FTTL(5)*6,FLNM(5)*2,FF*10
CHARACTER*4 SOIL(2),TSDAY(2),TSMAN(2),TEMP
CHARACTER*1 ANS,BEL(6),CH(9),AAA
COMMON /BELL/ BEL
COMMON /DA/ IDAO,IDA1
DATA FTTL/'軸変位','軸荷重','枠荷重','間隙圧','セル圧'/
C
1000 FORMAT(A1)
1020 FORMAT(A2)
1210 FORMAT(7I7)

```



```

1650 FORMAT(/' 上記の値を確認 0.K. ? ( Y or Else ) '$)
C
DO 5 I=1,6,3
  BEL(I)=CHAR(7)
  BEL(I+1)=CHAR(0)
  BEL(I+2)=CHAR(8)
5
C
C ***** 外部ファイル読み込み
C
  FLNM(1)='B:'
  FLNM(4)='DT'
10 WRITE(*,2000)
2000 FORMAT(' 供試体種別の入力 (A2) = '$)
  READ(*,1020) FLNM(2)
  WRITE(*,2010)
2010 FORMAT(' 供試体番号の入力 (A2) = '$)
  READ(*,1020) FLNM(3)
  WRITE(*,2020) FLNM(2),FLNM(3)
2020 FORMAT(' データファイル名は <' ,2A2,'> ? ( Y or N ) '$)
  READ(*,1000) ANS
  IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 10
  WRITE(FF,'(A2,A2,A2,A2)') FLNM(1),FLNM(2),FLNM(3),FLNM(4)
  OPEN(8,FILE=FF,STATUS='OLD',FORM='UNFORMATTED')
  READ(8) SOIL,FLNM(3),TSDAY,TSMAN,TEMP
  READ(8) ICHN,NCHN
  READ(8) IDAO,IDA1,CNDL(1),CNDL(2),CNLD(1),CNLD(2)
  READ(8) VCAL(1),VCAL(2),VCAL(3),VCAL(4),VCAL(5),
1 VCAL(6),VCAL(7)
  READ(8) ZERO(1),ZERO(2),ZERO(3),ZERO(4),ZERO(5),
1 ZERO(6),ZERO(7)
  READ(8) HIGHT,WIDTH,DEPTH,VOLSP,DRAIN,BKP
  CLOSE(8)
C
30 OPEN(6,FILE='PRN:')
  NTL=10
C
  WRITE(6,2050)
2050 FORMAT(1H1,' ***** Program < STSHR > *****'//)
C
C ***** クロックスタート
  CALL CLOCK(1,TINT)
C
  FLNM(4)='SR'
  WRITE(FF,'(A2,A2,A2,A2)') FLNM(1),FLNM(2),FLNM(3),FLNM(4)
  OPEN(NTL,FILE=FF,STATUS='NEW',FORM='UNFORMATTED')

```

```

C
  WRITE(*,2100)
2100 FORMAT(' 現在のD/Aの値の入力'/
1 ' D/A-0ch & 1ch : (217) = '$)
  READ(*,1210) IDAO,IDA1
C *
C ***** ① 制御モード変更 (変位制御へ)
C *
  CD=CNLD(1)-CNLD(2)*FLOAT(IDAO)
  WRITE(*,2110) IDAO,CD
2110 FORMAT(/' << 制御モードを荷重制御から変位制御に変更 >>'/
1 10X,'D A-0 c hの出力数 (整数: d) = ',17/
2 10X,'制御信号の値 (mV) = ',F10.3/)
  WRITE(6,2120) IDAO
2120 FORMAT(/' 制御モード変更 (DA-0ch 出力数) = ',17,' Digit'/)
C
50 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN,SG1,SG2,SG3,0,0,0)
  WRITE(*,1650)
  READ(*,1000) ANS
  IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 50
C *
C ***** ② 静的せん断過程制御・解析プログラム *****
C *
  CALL EK120A(CH)
  VCH=CH(1:9)
  READ(VCH,'(F9.2)') DRAIN
C
  BKP=VAL(4)
  SIG3=VAL(5)
  CALL PSSTSH(ICHN,NCHN,SIG3,BKP,VCAL,ZERO,HIGHT,VOLSP,
1 NTL,DRAIN,WIDTH)
C
  CLOSE(NTL)
  CALL CLOCK(1,TINT)
C
  KF=36
  CALL APH(KF)
C
  STOP
  END

```

KCCYC.FOR

```

C *****
C * マイコン制御土質試験用リアルタイム制御・解析プログラム *
C * "KCCYC" Ver 1.0 Hasegawa Lab.( Kyoto Univ.) --- Dec. 1988 *
C *****
C * for Presonal Computer : PC-9801 vm *
C * A/D Convertor : CANOPUS ANALOG-PRO DMA *
C * D/A Convertor : CONTEC DA12-4 (98) *
C *****
C * 繰り返し平面ひずみ試験 (セル圧一定) 制御・解析プログラム *
C * ----- 京都大学農学部農業工学科農業施設工学研究室 ----- *
C *****
C < 本プログラムの内容 >
C ① 軸変位のゼロ点調整
C ② 非排水繰返し載荷制御プログラムの呼び出し
C *****
C
  DIMENSION VAL(7),VCAL(7),ZERO(7),VOLT(7),CNDL(2),CNLD(2)
  CHARACTER VCH*9,FTTL(5)*6,FLNM(5)*2,FF*10,FFF*10
  CHARACTER*4 SOIL(2),TSDAY(2),TSMAN(2),TEMP
  CHARACTER*1 ANS,BEL(6),CH(9),AAA
  COMMON /BELL/ BEL
  COMMON /DA/ IDAO,IDA1
  DATA FTTL/'軸変位','軸荷重','枠荷重','間隙圧','セル圧'/
C
1000 FORMAT(A1)
1020 FORMAT(A2)
1210 FORMAT(7I7)
1500 FORMAT(' 上記の値を確認 ( Y or N ) ? : '$)
1700 FORMAT(/' 値の確認 (' ,A6,' ) : ',F10.5,' ( Y or N ) '$)
C
DO 5 I=1,6,3
  BEL(I)=CHAR(7)
  BEL(I+1)=CHAR(0)
  BEL(I+2)=CHAR(8)
5
C
C ***** 外部ファイル読み込み
C
  FLNM(1)='B:'
  FLNM(4)='DT'
10 WRITE(*,2000)
2000 FORMAT(' 供試体種別の入力 (A2) = '$)
  READ(*,1020) FLNM(2)

```

```

  WRITE(*,2010)
2010 FORMAT(' 供試体番号の入力 (A2) = '$)
  READ(*,1020) FLNM(3)
  WRITE(*,2020) FLNM(2),FLNM(3)
2020 FORMAT(' データファイル名は <' ,2A2,'> ? ( Y or N ) '$)
  READ(*,1000) ANS
  IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 10
  WRITE(FF,'(A2,A2,A2,A2)') FLNM(1),FLNM(2),FLNM(3),FLNM(4)
  OPEN(8,FILE=FF,STATUS='OLD',FORM='UNFORMATTED')
  READ(8) SOIL,FLNM(3),TSDAY,TSMAN,TEMP
  READ(8) ICHN,NCHN
  READ(8) IDAO,IDA1,CNDL(1),CNDL(2),CNLD(1),CNLD(2)
  READ(8) VCAL(1),VCAL(2),VCAL(3),VCAL(4),VCAL(5),
1 VCAL(6),VCAL(7)
  READ(8) ZERO(1),ZERO(2),ZERO(3),ZERO(4),ZERO(5),
1 ZERO(6),ZERO(7)
  READ(8) HIGHT,WIDTH,DEPTH,VOLSP,DRAIN,BKP
  CLOSE(8)
C
20 WRITE(*,2030)
2030 FORMAT(/' 圧密試験を省略しましたか ? ( Y or N ) '$)
  READ(*,1000) ANS
  IF(ANS.EQ.'Y'.OR.ANS.EQ.'y') GO TO 30
  IF(ANS.NE.'N'.AND.ANS.NE.'n') GO TO 20
  FLNM(4)='IC'
  WRITE(FF,'(A2,A2,A2,A2)') FLNM(1),FLNM(2),FLNM(3),FLNM(4)
  OPEN(9,FILE=FF,STATUS='OLD',FORM='UNFORMATTED')
  READ(9) DRAIN
  CLOSE(9)
C
30 OPEN(6,FILE='PRN:')
  NTL=10
C
  WRITE(6,2050)
2050 FORMAT(1H1,' ***** Program < KCCYC > *****'//)
C
C ***** クロックスタート
  CALL CLOCK(1,TINT)
C
  FLNM(4)='DY'
  WRITE(FFF,'(A2,A2,A2,A2)') FLNM(1),FLNM(2),FLNM(3),FLNM(4)
  OPEN(NTL,FILE=FFF,STATUS='NEW',FORM='UNFORMATTED')
C *
C ***** ① 軸変位のゼロ点調整 *****
C *

```



```

WRITE(*,2060)
2050 FORMAT(' 現在のD/Aの値の入力')
1 '      D/A-0ch & lch : (217) = '$)
READ(*,1210) IDA0,IDA1
C
WRITE(*,2100)
2100 FORMAT(' 繰返し載荷のためのD I S Pのゼロ点調整')
WRITE(*,2110)
2110 FORMAT(' 調整前のサンプリングを行います。')
1 ' ***** IF READY , HIT RETURN KEY !! *****')
READ(*,1000) ANS
50 CALL SNGLAD(1,0,0,1,VAL)
DISP=(VAL(1)-ZERO(1))*VCAL(1)
WRITE(*,2120) VAL(1),DISP
2120 FORMAT('/' 現在のD I S P (A/D-0ch) の値 *****')
1 '      ,F7.4,' Volt ----> ',F7.4,' mm')
WRITE(*,1500)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 50
VAL11=VAL(1)
C
60 WRITE(*,2130)
2130 FORMAT('/' D I S Pの出力調整を行う(約0ボルト)')
1 ' 調整後のサンプリング'
2 ' ( Hit Return , Sampling Start ! ) '$)
READ(*,1000) AAA
CALL SNGLAD(1,0,0,1,VAL)
DPSFT=VAL(1)-VAL11
ZERO1=ZERO(1)+DPSFT
WRITE(*,2140) VAL(1),DPSFT,ZERO1
2140 FORMAT(1H ,/' ***** 調整の結果(変位) *****')
1 1H , ' 現在のボルト数 : ',F10.5,' Volt'
2 1H , ' シフトボルト数 : ',F10.5,' Volt'
3 1H , ' 調整後のゼロ点 : ',F10.5,' Volt'
WRITE(*,1500)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 60
WRITE(6,2140) VAL(1),DPSFT,ZERO1
ZERO(1)=ZERO1
C
70 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,DRAIN0,SG1,SG2,SG3,1,0,0)
WRITE(*,2160)
2160 FORMAT(' 繰返し載荷前の調整終了 ? ( Y or N ) '$)
READ(*,1000) ANS

```

```

IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 70
C *
C ***** ② 繰返し平面ひずみ試験制御・解析プログラム *****
C *
CALL PSDY(ICHN,NCHN,VCAL,ZERO,HIGHT,WIDTH,VOLSP,
1 AREA,FLNM,NTL,DRAIN0)
C
CALL CLOCK(1,TINT)
KF=36
CALL APH(KF)
C
CD=CNLD(1)-CNLD(2)*FLOAT(IDA0)
WRITE(*,2200) IDA0,CD
2200 FORMAT('/' << 制御モードを荷重制御から変位制御に変更 >>')
1 10X,'D A - 0 c hの出力数(整数:d) =',17/
2 10X,'制御信号の値(mV) = ',F10.3/
WRITE(6,2210) IDA0
2210 FORMAT('/' 制御モード変更(DA-0ch 出力数) = ',17,' Digit')
C
WRITE(*,2300) IDA0,IDA1
WRITE(6,2300) IDA0,IDA1
2300 FORMAT(1H , ' 現在のD/Aの値 D/A-0ch : ',15,
1 ' digit , D/A-lch : ',15,' digit')
C
CLOSE(NTL)
C
STOP
END

```

PSZC.FOR

```

SUBROUTINE PSZC(ICHN,NCHN,ZERO,VALC,VCAL,CAL,TLCAL,
1 UNIT,11,KCH)
C *****
C * << プログラムの説明>> *
C * ゼロ点とキャリブレーションのサンプリング *
C * <引数の説明> *
C * ICHN : A/Dスタートチャンネル番号 *
C * NCHN : A/Dサンプリングチャンネル数 *
C * ZERO : Z e r o c a lの値 *
C * VALC : C a l (500 or 1000 μ)の値 *
C * VCAL : 単位ボルト当りのC a l値 *
C * CAL : C A P / C M × V C L *

```

```

C * TLCAL : DISP,AXLD,PSLD,PORE,SIG3,GAP1,GAP2 *
C * UNIT : 変換器の測定単位 *
C * 11 : = N C H N *
C * KCH : チャンネル番号→D I M番号への変換 *
C *****
DIMENSION ZERO(7),VALC(7),CAL(7),VCAL(7),
1 KCH(7),CAP(7),CM(7)
CHARACTER ANS*1,TLCAL(7)*4,UNIT(7)*4
DATA CAP,CM/50.,300.,300.,5.,10.,0.,0.,
1 3166.,2325.,2205.,4005.,4005.,0.,0./
C ***** 上記パラメータ設定日 1988.10.25 *****
C * << Transducer Serial Number >> *
C * 変位計 : YA1996 *
C * 軸荷重計 : 866500001 *
C * 平面歪荷重計 : 866500002 *
C * 間隙水圧計 : Y8481002 *
C * セル圧計 : YK0899 *
C *****
C
1000 FORMAT(A1)
1100 FORMAT(14I5)
1200 FORMAT(7F10.0)
C
IS=ICHN+1
IE=ICHN+NCHN
IF(IE.LE.7) GO TO 25
WRITE(*,2100) ICHN,NCHN
2100 FORMAT(' 引数エラー: ICHN+NCHN>7 --ICHN,NCHN=',2I5)
STOP
25 WRITE(*,2110) (I,TLCAL(I),I=IS,IE)
2110 FORMAT(1H , '<< "ZERO" と "CAL" のサンプリング >>')
1 1H ,5(12,'-CH ',A4,2X)/
11=NCHN
IF(11.GT.0) GO TO 30
WRITE(*,2120)
2120 FORMAT(' 引数エラー: NCHN=0')
STOP
C
30 DO 35 I=1,11
35 KCH(I)=ICHN+I
WRITE(6,2200)
2200 FORMAT(1H , '***** キャリブレーション *****')
WRITE(*,2210)
2210 FORMAT(1H , '*** C A L値の代入 ***')
DO 50 I=1,1E

```

```

DO 40 J=1,11
IF(KCH(J).EQ.1) GO TO 45
GOTO 50
45 CAL(I)=CAP(I)/CM(I)
WRITE(*,2220) TLCAL(I)
2220 FORMAT(1H ,10X,A4,' - C A L値の入力(MICRO, F10.0) '$)
READ(*,1200) VCL
CAL(I)=CAL(I)*VCL
WRITE(6,2230) TLCAL(I),CAP(I),CM(I),VCL,CAL(I),UNIT(I)
2230 FORMAT(1H ,7X,A4,' ( ',3F6.0,' ) C A L値=',F10.5,
1 2X,A4,' / MICRO')
50 CONTINUE
60 WRITE(*,2240)
2240 FORMAT(1H , '***** 操作手順(キャリブレーション) *****')
1 10X,'(1) "R-Balance"で各チャンネルのゼロ点を調整。'
1 10X,'(2) "Auto Zero Balancing"を押す。!!!')
CALL ZERCAL('ZERO',ICHN,NCHN,ZERO,11,KCH)
CALL ZERCAL('CALB',ICHN,NCHN,VALC,11,KCH)
WRITE(6,2250)
2250 FORMAT(1H , '*** 単位ボルトあたりのC A L値 ***')
DO 75 I=1,1E
DO 65 J=1,11
65 IF(KCH(J).EQ.1) GO TO 70
GOTO 75
70 IC=I-1
VVV=VALC(I)-ZERO(1)
IF(VVV.EQ.0.) VVV=0.01
VCAL(I)=CAL(I)/VVV
WRITE(*,2300) IC,TLCAL(I),VCAL(I),UNIT(I)
WRITE(6,2300) IC,TLCAL(I),VCAL(I),UNIT(I)
2300 FORMAT(1H ,5X,'#',12,' CHANNEL ( ',A4,' ) ---->',F12.5,
1 2X,A4,' / VOLT')
75 CONTINUE
80 WRITE(*,2310)
2310 FORMAT(' "ZERO" と "CAL" のレベルはよいか? '
1 ' ( Y or N ) '$)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.EQ.'N'.OR.ANS.EQ.'n') GO TO 60
IF(ANS.EQ.'Y'.OR.ANS.EQ.'y') GO TO 85
GO TO 80
85 WRITE(*,2320)
2320 FORMAT(1H , 'もう一度最初からサンプリングしますか? '
1 ' ( Y or N ) '$)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.EQ.'N'.OR.ANS.EQ.'n') GO TO 90

```



```

IF(ANS.EQ.'Y'.OR.ANS.EQ.'y') GO TO 25
GO TO 85
90 CONTINUE
C
99 RETURN
END

```

PSKNCN.FOR

```

SUBROUTINE PSKNCN(ICHN,NCHN,VCAL,ZERO,VAL,HIGHT,WIDTH,
I VOLSP,DRAIN,NTL)
C *****
C * Ko-圧密制御プログラム (荷重制御) *
C * Coded by T. Kimata (Kyoto Univ.) --- Mar. 1991 *
C * ----- *
C * <プログラムの説明> *
C * ① Ko-圧密制御条件の指定 *
C * ② p一定せん断によるKo-基準状態決定 *
C * ③ Ko-圧密制御 *
C * 1. 軸圧の等速度載荷 (増加) *
C * 2. 側方ひずみの計算・セル圧の調整 (4サイクル) *
C * <引数・変数の説明> *
C * AK31 : Ko-値 *
C * CINT : 軸方向D/A出力間隔 (秒) *
C * DINT : 側方応力調整D/A出力間隔 (秒) *
C * DPL : 基準状態での平均主応力の許容範囲 *
C * NINT : データ出力間隔 (p一定せん断, Ko圧密, 放置時) *
C * BK31 : 各時点でのK( $\sigma_3/\sigma_1$ )値 *
C * PLST : 圧密終了平均有効主応力 (Ko-制御時) *
C *****
C
DIMENSION VCAL(7),ZERO(7),VAL(7),VOLT(7)
CHARACTER BEL(6)*1,CH(9)*1,VCH*9,ANS*1,CHR*1,AAA*1
COMMON /BELL/ BEL
COMMON /DA/ IDAO,IDA1
C
1000 FORMAT(A1)
1200 FORMAT(F10.5)
1300 FORMAT(I3)
1500 FORMAT(' 上記の値を確認 (Y or N) ? : '$)
C
C *
C ***** ① Ko-圧密制御条件の入力 *****

```

```

C *
10 WRITE(*,2100)
2100 FORMAT(/' ***** 基準状態までのp一定圧縮制御 *****'//
1 ' 基準Ko-値( $\sigma_3/\sigma_1$ ) (概算) = '$)
READ(*,1200) AK31
WRITE(*,2120)
2120 FORMAT(/' 制御目標平均有効主応力 p (kgf/cm2) = '$)
READ(*,1200) PPO
WRITE(*,2140)
2140 FORMAT(/' 軸荷重増加時のD/A出力間隔 (sec) = '$)
READ(*,1200) CINT1
WRITE(*,2160) AK31,PPO,CINT1
2160 FORMAT(/1H,' 基準状態までの制御条件'/
1 1H,' 指定Ko-基準値 : ',F8.4,/
2 1H,' 平均有効主応力 : ',F8.4,' (kgf/cm2)'/
3 1H,' D/A出力間隔 : ',F8.4,' (sec)'/)
WRITE(*,1500)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 10
WRITE(6,2160) AK31,PPO,CINT1
C
15 WRITE(*,2200)
2200 FORMAT(/' ***** Ko-圧密 (無段階) 制御 *****'//
1 ' 圧密終了平均有効主応力 (kgf/cm2) = '$)
READ(*,1200) PLST
WRITE(*,2220)
2220 FORMAT(/' 軸荷重増加時のD/A出力間隔 (sec) = '$)
READ(*,1200) CINT2
WRITE(*,2260) PLST,CINT2
2260 FORMAT(/1H,' ***** Ko-圧密制御条件の確認 *****'/
1 1H,' 圧密終了平均有効主応力 : ',F8.4,' (kgf/cm2)'/
2 1H,' 荷重D/A出力時間間隔 : ',F8.4,' (sec)'/)
WRITE(*,1500)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 15
WRITE(6,2260) PLST,CINT2
C
C ***** パラメータの指定
DPL=0.003
NINT=5
DINT1=(CINT1-2.0)/4.0
DINT2=(CINT2-2.0)/5.0
C *
C ***** ② p一定せん断制御 (基準状態の決定) *****
C *

```

```

WRITE(*,2300)
2300 FORMAT(/' サーボアンプ・コントロールレベルの調整')
20 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
I VOLSP,AREA,DRAIN,SG1,SG2,SG3,0,0,0)
WRITE(*,1500)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 20
HGHTO=HIGHT-VAL(1)*0.1
VLSP0=VOLSP+VAL(NCHN+1)
C
I1=0
I2=0
IPRN=0
C
C ***** 軸圧縮開始
25 IF(I2.NE.0) CALL DACTRL(0,1,1,0)
IF(MOD(I2,NINT).EQ.0) IPRN=1
C
DO 30 L=1,4
CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
I VOLSP,AREA,DRAIN,SG1,SG2,SG3,IPRN,DINT1)
BK31=SG3/SG1
IF(BK31.LE.AK31) GO TO 40
HGHT=HIGHT-VAL(1)*0.1
WDTH=WIDTH
VLSP=VOLSP+VAL(NCHN+1)
DPTH=VLSP/HGHT/WDTH
IF(IPRN.EQ.1) WRITE(NTL) I1,
& HGHT,WDTH,DPTH,VLSP,BK31,SG1,SG2,SG3
IPRN=0
PPP=(SG1+SG2+SG3)/3.0
IF(PPP-PPO.GT.DPL) CALL DACTRL(1,-1,1,0)
30 CONTINUE
C
I2=I2+1
I1=I2/NINT
GO TO 25
C
C ***** 基準状態の値 *****
40 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
I VOLSP,AREA,DRAIN,SG1,SG2,SG3,1,0,0)
C
SHGHT=HIGHT-VAL(1)*0.1
SWDTH=WIDTH
SVLSP=VOLSP+VAL(NCHN+1)

```

```

SDPTH=SVLSP/SHGHT/SWDTH
SDRN=VOLT(NCHN+1)
SAREA=SVLSP/SHGHT
AK31=SG3/SG1
C
WRITE(*,2320) SHGHT,SWDTH,SDPTH,SDRN,AK31,SG1,SG3,
I IDAO,IDA1
2320 FORMAT(/1H,' ***** 基準状態の各値 *****'//
1 1H,' 供試体高さ : ',F10.4,' (cm)'/
2 1H,' 供試体 幅 : ',F10.4,' (cm)'/
3 1H,' 供試体奥行 : ',F10.4,' (cm)'/
4 1H,' 排水量 : ',F10.4,' (cm3)'/
5 1H,' K 値 : ',F10.4,/
6 1H,'  $\sigma_1, \sigma_3$  : ',2F7.4,/
7 1H,' (D/A #0 & #1 : ',15,' & ',15,' (digit)')//)
WRITE(6,2320) SHGHT,SWDTH,SDPTH,SDRN,AK31,SG1,SG3,
I IDAO,IDA1
KK=0
WRITE(NTL) KK,SHGHT,SWDTH,SDPTH,SVLSP,AK31,SG1,SG2,SG3
C *
C ***** ③ Ko-圧密制御ルーチン *****
C *
I11=1
I12=0
IPRN=0
C
C ***** 軸圧縮開始
50 CALL DACTRL(0,1,2,0)
I12=I12+1
I11=I12/NINT
IF(MOD(I12,NINT).EQ.0) IPRN=1
C
DO 55 L=1,5
CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
I VOLSP,AREA,DRAIN,SG1,SG2,SG3,IPRN,DINT2)
PPP=(SG1+SG2+SG3)/3.0
IF(PPP.GE.PLST-0.002) GO TO 60
HGHT=HIGHT-VAL(1)*0.1
WDTH=WIDTH
VLSP=VOLSP+VAL(NCHN+1)
DPTH=VLSP/HGHT/WDTH
AREA=VLSP/HGHT
BK31=SG3/SG1
IF(IPRN.EQ.1) WRITE(NTL) I11,
& HGHT,WDTH,DPTH,VLSP,BK31,SG1,SG2,SG3

```



```

      IPRN=0
      IF(AREA.GT.SAREA) CALL DACTRL(1,1,0.0)
55  CONTINUE
C
      GO TO 50
C
60  WRITE(*,2400)
      WRITE(6,2400)
2400 FORMAT(/1H,' ***** Ko-圧密、圧縮過程終了 *****'/)
      CALL PSCLSG(1CHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1  VOLSP,AREA,DRAIN,ESG1,ESG2,ESG3,1,0.0)
C
      EHGT=HIGHT-VAL(1)*0.1
      EWDTH=WIDTH
      EVLSP=VOLSP+VAL(NCHN+1)
      EDPH=EVLSP/EHGT/EWDTH
      EDNRN=VOLT(NCHN+1)
      EAREA=EVLSP/EHGT
      AK31=ESG3/ESG1
      WRITE(*,2420) EHGT,EWDTH,EDPH,EDNRN,AK31,
& ESG1,ESG2,ESG3,IDA0,IDA1
2420 FORMAT(/1H,' ***** 現在の状態の各値 *****'/)
1 1H,' 供試体高さ : ',F10.4,' (cm) '/
2 1H,' 供試体 幅 : ',F10.4,' (cm) '/
3 1H,' 供試体奥行 : ',F10.4,' (cm) '/
4 1H,' 排水量 : ',F10.4,' (cm3) '/
5 1H,' K 値 : ',F10.4,' /
6 1H,' σ1,σ2,σ3: ',3F7.4,' /
7 1H,' ( D/A #0 & #1 : ',15,' & ',15,' (digit)')//)
      WRITE(6,2420) EHGT,EWDTH,EDPH,EDNRN,AK31,
& ESG1,ESG2,ESG3,IDA0,IDA1
      KK=999
      WRITE(NTL) KK,EHGT,EWDTH,EDPH,EVLSP,AK31,
& ESG1,ESG2,ESG3
C
C ***** Ko-状態維持・調整ルーチン
C * (ESC)キーを押すまで制御を継続)
      DSG1=0.003
      DAREA=0.001
C * DSG1,DAREA : 維持・制御中の許容変動値
      IPRN=0
      NNINT=NINT*5
C
      CALL CLOCK(0,TSECO)
      TINTO=TSECO

```

```

      PPP=(SG1+SG2+SG3)/3.0
      QQQ=SG1-SG3
      AK31=SG3/SG1
      DH=HGHTO-HGHT
      EPS1=DH/HGHTO
      DV=VLSP-VOLSP
      EPSV=DV/VLSP
      WRITE(*,2900) PLST,AK31,SG1,HGHT,SG2,WDTH,SG3,DPTH,PPP,
& VLSP,QQQ,DH,EPS1,DV,EPSV
2900 FORMAT(/1H,' *** Ko-圧密終了 (p=',F8.4,' (kgf/cm2)) ***'/)
1 1H,' < 結果 > '/
2 1H,' K : ',F8.5,' (σ3/σ1) '/
3 1H,' σ1 : ',F8.5,' (kgf/cm2) 高さ : ',F8.5,' (cm) '/
4 1H,' σ2 : ',F8.5,' (kgf/cm2) 幅 : ',F8.5,' (cm) '/
5 1H,' σ3 : ',F8.5,' (kgf/cm2) 奥行 : ',F8.5,' (cm) '/
6 1H,' p : ',F8.5,' (kgf/cm2) 体積 : ',F8.3,' (cm3) '/
9 1H,' q : ',F8.5,' (kgf/cm2) Δ高さ : ',F8.5,' (cm) '/
1 1H,' ε1 : ',F8.5,' Δ体積 : ',F8.5,' (cm3) '/
2 1H,' εv : ',F8.5,' /
C
      WRITE(*,1500)
      READ(*,1000) ANS
      IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 90
      WRITE(6,2900) PLST,AK31,SG1,HGHT,SG2,WDTH,SG3,DPTH,PPP,
& VLSP,QQQ,DH,EPS1,DV,EPSV
      KK=-1
      WRITE(NTL) KK,HGHT,WDTH,DPTH,VLSP,AK31,SG1,SG2,SG3
C
      RETURN
      END

```

PSSTSH.FOR

```

      SUBROUTINE PSSTSH(1CHN,NCHN,SIG3,BKP,VCAL,ZERO,HIGHT,
1  VOLSP,NTL,VOLO,WIDTH)
C *****
C * 静的平面ひずみせん断試験プログラム *
C * (せん断速度: D/Aの出力間隔 (1 Digit あたり) による) *
C * ----- *
C * <プログラムの説明> *
C * ① 静的せん断制御条件の指定 *
C * ② 静的せん断制御・解析 *
C * ③ 結果の出力 *

```

```

      JJ=0
C
70  WRITE(*,2500) DINT2
2500 FORMAT(/' Ko-状態維持・調整中 (' ,F6.1,' 秒間隔) '/
1  (終了する場合は [ ESC ] キーを押す) '/')
75  CALL CLOCK(0,TSEC1)
      CALL KEYIN(CHR)
      IF(ICHAR(CHR).EQ.27) GO TO 90
      CALL KEYIN(CHR)
      IF(ICHAR(CHR).EQ.27) GO TO 90
      TINT=TSEC1-TINTO
      TDSP=TSEC1-TSECO
      CALL DISPTM(TDSP)
      IF(TINT.LT.DINT2) GO TO 75
      TINTO=TSEC1
C
      IF(MOD(JJ,NNINT).EQ.0) IPRN=1
      CALL PSCLSG(1CHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1  VOLSP,AREA,DRAIN,SG1,SG2,SG3,IPRN,0.0)
C
      HGHT=HIGHT-VAL(1)*0.1
      WDTH=WIDTH
      VLSP=VOLSP+VAL(NCHN+1)
      DPTH=VLSP/HGHT/WDTH
      AREA=VLSP/HGHT
      BK31=SG3/SG1
      I11=JJ/NNINT
      IF(IPRN.EQ.1) WRITE(NTL) I11,
& HGHT,WDTH,DPTH,VLSP,BK31,SG1,SG2,SG3
      IPRN=0
      IF(SG1.GT.ESG1+DSG1) CALL DACTRL(0,-1,0.0)
      IF(SG1.LT.ESG1-DSG1) CALL DACTRL(0,+1,0.0)
      IF(AREA.GE.SAREA+DAREA) CALL DACTRL(1,+1,0.0)
      IF(AREA.LE.SAREA-DAREA) CALL DACTRL(1,-1,0.0)
      JJ=JJ+1
      GO TO 70
C
C ***** Ko-圧密、全過程終了
90  CALL PSCLSG(1CHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1  VOLSP,AREA,DRAIN,SG1,SG2,SG3,1,0.0)
C
      HGHT=HIGHT-VAL(1)*0.1
      WDTH=WIDTH
      VLSP=VOLSP+VAL(NCHN+1)
      DPTH=VLSP/HGHT/WDTH

```

```

C * <変数の説明> *
C * NSAMP : 各段階のサンプリング個数 (個) *
C * TIME : 各段階のサンプリング間隔・速度 (秒) *
C * TTM : 各サンプリング時間 (秒) *
C * TDA : D/Aの出力間隔 (秒) *
C *****
      DIMENSION VCAL(7),ZERO(7),ZZZ(7),VAL(7),VOLT(7)
      DIMENSION TIME(10),NSAMP(10),VVV(7,120),TTM(120)
      CHARACTER*1 ANS,BEL(6),ICHR
      COMMON /BELL/ BEL
      COMMON /DA/IDA0,IDA1
C
1000 FORMAT(A1)
1200 FORMAT(7F10.0)
C
      WRITE(*,2000) SIG3,BKP
      WRITE(6,2000) SIG3,BKP
2000 FORMAT(/1H..' ***** 静的せん断過程 *****'/)
1 1H,' 5X,' (セル圧 =',F5.2,' kg/cm2 '
2  ' 背圧 =',F5.2,' kg/cm2 ')')
C *
C ***** ① せん断条件の入力 *****
C *
C FRG : 非排水試験 = 1. , 排水試験 = 0.
C ISTG : A/Dサンプリングを変化させる回数
      CALL PSSTIN(SIG3,BKP,FRG,ISTG,NSAMP,TIME,NTL)
C
      WRITE(*,3000)
3000 FORMAT(/' D/Aの出力時間間隔 (秒) の入力 = '$)
      READ(*,1200) TDA
      WRITE(*,3100)
3100 FORMAT(/' 初期値サンプリングの後、せん断スタート')
      CALL START(BEL,0,TINT)
      CALL PSCLSG(1CHN,NCHN,VOLT,ZZZ,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1  VOLSP,AREA,VOLO,SG1,SG2,SG3,1,0.0)
      HGHTO=HIGHT-VAL(1)*0.1
      VLSP=VOLSP+VAL(NCHN+1)
      AREA=VLSP/HGHTO
C *
C ***** ② 静的せん断制御・解析
C *
      TTM(1)=0.0
      DO 10 I=1,6
10  VVV(I,1)=ZZZ(I)
      TINT1=0.

```



```

      NUM=1
      FMAX=-1000.
      PSDSP=0.0
      TT=0.
C
C ***** サンプリングスタート *****
      DO 70 I=1,ISTG
      DO 70 J=1,NSAMP(I)
      NUM=NUM+1
      TT=TT+TIME(I)
      TTM(NUM)=TT
      JJ=0
20    JJ=JJ+1
      TICK=TT-3.0+1.0*FLOAT(JJ)
25    CALL CLOCK(0,TINT)
      CALL DISPTM(TINT)
C *** D A出力 (時間間隔 T D A 秒)
      TI=TINT-TINTI
      IF(TI.LT.TDA) GO TO 30
      TINTI=TINT
      CALL DASUB1(IDAO,0)
      IF(TINT.GE.TICK) GO TO 40
      IF(TINT.GE.TT-5.) GO TO 25
      CALL KEYIN(ICHR)
      IF(ICHR(ICHR).NE.27) GO TO 35
      WRITE(*,3150)
3150  FORMAT(' [ESC] キーを検出 → 終了 ? ( Y or N ) : '$)
      READ(*,1000) ANS
      IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 25
      IJK=2
      JJ=3
      GO TO 40
C
35    IF(ICHR(ICHR).LT.64) GO TO 25
      IK=0
      GO TO 45
40    CALL OUTSTR(BEL,JJ)
      IF(JJ.LT.3) GO TO 20
      IK=1
      TINT=TT
      WRITE(*,3200) NUM,TTM(NUM)
3200  FORMAT(/1H,'** NOW, SAMPLING ( NO.=',I3,' TIME =',
1 F10.0,' SEC ) **')
45    CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
1 VOLSP,AREA,VOLQ,SG1,SG2,SG3,1,1.0)

```

```

      QQQ=SG1-SG3
      IF(IK.EQ.0) GO TO 25
      DO 50 K=ICHN+1,ICHN+NCHN+1
50    VVV(K,NUM)=VAL(K)
      IF(QQQ.LE.FMAX) GO TO 55
      FMAX=QQQ
      AXDSP=VVV(1,NUM)/HGHTO*10.
55    IF(AXDSP.GT.18.) IJK=1
      IF(IJK.NE.0) GO TO 90
70    CONTINUE
C
      WRITE(*,3250)
      WRITE(6,3250)
3250  FORMAT(1H,' ***** 指定サンプリング回数終了 *****')
C *
C ***** ③ サンプリング終了→結果の出力 *****
C *
90    WRITE(*,3300) FMAX,AXDSP,PSDSP
      WRITE(6,3300) FMAX,AXDSP,PSDSP
3300  FORMAT(1H,'5X,'FMAX, AXDSP, PSDSP =' ,3F7.3)
      WRITE(*,3400) I,J
      WRITE(6,3400) I,J
3400  FORMAT(1H,'5X,'サンプリング終了時 : I=',I4,' J=',I4/)
      IF(IJK.EQ.1) WRITE(*,3510)
      IF(IJK.EQ.1) WRITE(6,3510)
      IF(IJK.EQ.2) WRITE(*,3520)
      IF(IJK.EQ.2) WRITE(6,3520)
3510  FORMAT(1H,' ***** 軸ひずみ > 18% *****')
3520  FORMAT(1H,' ***** [ESC] による終了 *****')
C
      CALL PSSTOT(NUM,VVV,TTM,VLSPD,AREAO,HGHTO,VOLQ,VOLSP,
1 HIGHT,WIDTH,BKP,FRG,NTL)
C
      RETURN
      END

```

PSSTIN.FOR

```

      SUBROUTINE PSSTIN(SIG3,BKP,FRG,ISTG,NSAMP,TIME,NTL)
C *****
C * 静的平面ひずみせん断条件の入力プログラム *
C * ----- *
C * (入力条件項目) *

```

```

C * ① 排水条件 (非排水:FLG=0., 排水:FLG=1.) *
C * ② 試験条件 (特徴など) *
C * ③ A/Dサンプリングの変化回数 *
C *      ・各段階のサンプリング時間間隔 *
C *      ・各段階のサンプリング回数 *
C *****
      DIMENSION TIME(10),NSAMP(10)
      CHARACTER ANS*1,TITLE(20)*4
C
1000  FORMAT(A1)
1020  FORMAT(20A4)
1220  FORMAT(10I2)
1230  FORMAT(10I3)
C
10    WRITE(*,2100)
2100  FORMAT(/' 非排水せん断試験 ? ( Y or N ) '$)
      READ(*,1000) ANS
      IF(ANS.EQ.'Y'.OR.ANS.EQ.'y') GO TO 25
      IF(ANS.EQ.'N'.OR.ANS.EQ.'n') GO TO 20
      GO TO 10
20    FRG=0.
      WRITE(*,2150)
      WRITE(6,2150)
2150  FORMAT(/1H,' このせん断試験は、<< 排水条件 >> です')
      GO TO 30
25    FRG=1.
      WRITE(*,2160)
      WRITE(6,2160)
2160  FORMAT(/1H,' このせん断試験は、<< 非排水条件 >> です')
30    WRITE(*,2170)
2170  FORMAT(/' 上記の試験条件を確認 OK ? ( Y or N ) '$)
      READ(*,1000) ANS
      IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 10
C
      WRITE(*,2200)
2200  FORMAT(/' 試験条件 (せん断速度、供試体の特徴、他) の入力',
1 ' (20A4)')
      READ(*,1020) TITLE
      WRITE(6,2210) TITLE
2210  FORMAT(1H0,'試験条件 (せん断速度、供試体の特徴、他) '/
1 1H,'5X,20A4/)
      WRITE(NTL) SIG3,BKP,TITLE
C
50    WRITE(*,2300)
2300  FORMAT(/' A Dサンプリング速度を変化させる回数の入力',

```

```

1 ' ( I2 ) =' $)
      READ(*,1220) ISTG
      DO 60 I=1,ISTG
      WRITE(*,2350) I
2350  FORMAT(' 第',I2,' 番目の段階 --- サンプリング速度'
1 ' (HHMMSS) =' $)
      READ(*,1220) IH,IM,IS
      WRITE(*,2360)
2360  FORMAT(' サンプリング回数'
1 ' ( I3 ) =' $)
      READ(*,1230) NSAMP(I)
      TIME(I)=FLOAT(IH)*3600.+FLOAT(IM)*60.+FLOAT(IS)
60    CONTINUE
C
      WRITE(*,2400) (TIME(I),NSAMP(I),I=1,ISTG)
2400  FORMAT(/1H,' << サンプリング時間間隔・回数 >>'/
1(1H,'5X,'サンプリング時間間隔 =' ,F6.0,' 秒 × ',I3,' 回'))
80    WRITE(*,2450)
2450  FORMAT(/' 上記のサンプリング時間間隔と回数を確認 OK ? ',
1 ' ( Y or N ) '$)
      READ(*,1000) ANS
      IF(ANS.EQ.'Y'.OR.ANS.EQ.'y') GO TO 90
      IF(ANS.EQ.'N'.OR.ANS.EQ.'n') GO TO 50
      GO TO 80
90    WRITE(6,2400) (TIME(I),NSAMP(I),I=1,ISTG)
      RETURN
      END

```

PSSTOT.FOR

```

      SUBROUTINE PSSTOT(NUM,VVV,TTM,VLSPD,AREAO,HGHTO,VOLQ,
1 VOLSP,HIGHT,WIDTH,BKP,FRG,NTL)
C *****
C * 静的平面ひずみせん断結果出力用プログラム *
C * (ファイル・セーブ内容) *
C * NUM (サンプリング数) *
C * No., 軸歪, σ1, σ2, σ3, 体積歪, 間隙水圧 *
C *****
      DIMENSION VVV(7,120),TTM(120),VMAX(8)
C **** FRG=1.0 : UNDRAINED CONDITION
C      =0.0 : DRAINED CONDITION
      WRITE(6,2100)
2100  FORMAT(1H,'133('-')/1H,'1 NO I TIME I DISP ',

```



```

1 'I AXSTRN I DRAIN I D DRN I VLSTRN I LOAD '
2 'I SIG-1 I SIG-2 I SIG-3 I PORE I Q '
3 'I P I'
4 IH ,I I (HH:MM:SS)I (MM) I (%) I (CC) '
5 'I (CC) I (%) I (KG) I',6('KG/CM*2)I')/
6 IH ,I33('')
DFSMAX=-100.
NPEK=0
DVOL=0.
VLSTRN=0.
WRITE(NTL) NUM
DO 88 I=1,NUM
II=I
89 IH=TTM(I)/3600.
TIM=TTM(I)-FLOAT(IH)*3600.
IM=TIM/60.
IS=TIM-FLOAT(IM)*60.
VLSP=VOLSP-VVV(6,I)
IF(FRG.EQ.1.) GO TO 182
VLSP=VOLSP-VVV(6,I)
DVOL=VLSP-VLSP
BRET=VVO+VVV(6,I)
VLSTRN=DVOL/VLSP*100.
182 HGHT=HIGHT-VVV(1,I)*0.1
DISP=(HGHT-HGHT)*10.
AXSTRN=DISP/HGHT*10.
AREA=VLSP/HGHT
AREAP=VLSP/WIDTH
PORE=(VVV(4,I)-VVV(4,I))*FRG
SIG3=VVV(5,I)-VVV(4,I)
SIG1=VVV(2,I)/AREA-VVV(4,I)+VVV(5,I)
SIG2=VVV(3,I)/AREAP-VVV(4,I)+VVV(5,I)
DFSTRS=SIG1-SIG3
STMEAN=(SIG1+SIG2+SIG3)/3.
IF(DFSTRS.LE.DFSMAX) GO TO 287
NMAX=I
DFSMAX=DFSTRS
VMAX(1)=AXSTRN
VMAX(2)=VLSTRN
VMAX(3)=SIG1
VMAX(4)=SIG2
VMAX(5)=SIG3
VMAX(6)=VVV(4,I)
VMAX(7)=DFSTRS
VMAX(8)=STMEAN

```

```

287 WRITE(NTL) II,AXSTRN,SIG1,SIG2,SIG3,VLSTRN,VVV(4,I)
WRITE(6,2200) I,IH,IM,IS,VVV(1,I),AXSTRN,BRET,DVOL,
I VLSTRN,VVV(2,I),SIG1,SIG2,SIG3,VVV(4,I),DFSTRS,STMEAN
IF(1.EQ.1) WRITE(6,2210)
2200 FORMAT(IH ,I',I3,' I',I3,':',I2,':',I2,' I',2(F8.4,' I'),
I 2(F8.2,' I'),F8.4,' I',F8.3,' I',6(F8.4,' I'))
IF(MOD(II,10).EQ.0.AND.MOD(II,30).NE.0) WRITE(6,2210)
IF(MOD(II,30).EQ.0) WRITE(6,2100)
88 CONTINUE
999 WRITE(6,2210)
2210 FORMAT(IH ,I33(''))
WRITE(*,3700) NUM,NMAX,(VMAX(I),I=1,8),AXSTRN,DFSTRS
WRITE(6,3700) NUM,NMAX,(VMAX(I),I=1,8),AXSTRN,DFSTRS
3700 FORMAT(/IHO,'SAMPLING NUMBER =',I5/
I IH ,<< PEAK DIF. STRESS DATA >>'/
2 IH ,5X,'MAXIMUM =',I5/
3 IH ,5X,'AXIAL STRAIN =',F8.4,' %'/
4 IH ,5X,'VOLUMETRIC STRAIN =',F8.4,' %'/
5 IH ,5X,'SIGMA-1 =',F8.4,' KG/CM**2'/
6 IH ,5X,'SIGMA-2 =',F8.4,' KG/CM**2'/
7 IH ,5X,'SIGMA-3 =',F8.4,' KG/CM**2'/
8 IH ,5X,'PORE PRESSURE =',F8.4,' KG/CM**2'/
9 IH ,5X,'DIF. STRESS (Q) =',F8.4,' KG/CM**2'/
I IH ,5X,'MEAN PR STR (P) =',F8.4,' KG/CM**2'/
2 IHO,'<< TEST END DATA >>'/
3 IH ,5X,'AXIAL STRAIN =',F8.4,' %'/
4 IH ,5X,'DIF. STRESS (Q) =',F8.4,' KG/CM**2'/
RETURN
END

```

PSDY. FOR

```

SUBROUTINE PSDY(ICHN,NCHN,VCAL,ZERO,HIGHT,WIDTH,VOLSP,
& AREA,FLNM,NTL,DRAIN)
C *****
C * 非排水繰返し平面ひずみ試験 制御・解析プログラム *
C * Using [ ANALOG-PRO DMA ] --- Handler Soft ( Canopus ) *
C * "PSDY" Ver 1.0 Hasegawa Lab. ( Kyoto Univ. ) -- Dec.1988 *
C * ----- *
C * <プログラムの説明> *
C * ① 非排水繰返し制御条件の指定 *
C * ② 制御プログラム (PSDAAD) の呼び出し *
C * ③ 結果の出力 *

```

```

C * <変数の説明> *
C * ES3 : 有効拘束圧  $\sigma_3'$  (kgf/cm2) *
C * WAVE : 振動周波数 *
C * SINT : (A/D サンプルング数) / (D/A 出力) *
C * CNTL : 1 周期あたりの A/D サンプルング数 *
C * FAQ : A/D ボードの周波数コード *
C * PES3 : 有効拘束圧  $\sigma_3'$  (kPa) *
C * TBS :  $\tau/\sigma_3'$  の値 *
C * PTAU :  $\tau \cdot \sigma_3'$  振動片振幅 (kPa) *
C *****
C
DIMENSION VAL(7),VCAL(7),ZERO(7),VOLT(7),CNLD(2),CNLD(2)
CHARACTER*1 ANS,PRANS,AAA,BEL(6)
CHARACTER FFF*10,TITLE2(20)*4,FLNM(5)*2,FTTL(5)*6
INTEGER FQC,TLEV1,TLEV2,SMP4
COMMON /BELL/ BEL
COMMON /DA/ IDA0,IDA1
DATA FTTL/'軸変位','軸荷重','枠荷重','間隙圧','セル圧'/
C
1000 FORMAT(A1)
1100 FORMAT(7F10.0)
1210 FORMAT(7I7)
1650 FORMAT(/' 上記の値を確認 O.K. ? ( Y or Else ) '$)
1700 FORMAT(/' 値の確認 ('A6.') : 'F10.5,' ( Y or N ) '$)
C *
C ***** ① 繰返し制御条件の指定 *****
C *
I WRITE(*,3000)
3000 FORMAT(/' << 繰返し三軸試験制御プログラム >>'/
I ' 側圧 & 背圧の値の確認'/)
12 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
I VOLSP,AREA,DRAIN,SG1,SG2,SG3,0,0.0)
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 12
14 WRITE(*,3010)
3010 FORMAT(' 有効拘束圧  $\sigma_3'$  の指定 (kgf/cm2) = '$)
READ(*,1100) ES3
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 14
WRITE(*,3020)
3020 FORMAT(' 繰返し試験条件 (排水条件・出力レベルetc.) '
I ' の入力 ( 20A4 ) '/')

```

```

READ(*,3030) TITLE2
3030 FORMAT(20A4)
WRITE(*,3040)
3040 FORMAT(' 振動周波数 ( SINE WAVE (Hz : F10.0) ) '$)
READ(*,1100) WAVE
C ***** SINT:SAMPLING INTERVAL , CNTL:FRQ. of D/A CONTROL
SINT=10.0
CNTL=1000.0
CYC=WAVE*CNTL
SPEED=CYC/SINT
SMP=SPEED/WAVE
WRITE(*,3050) CYC
3050 FORMAT(' D/A 制御周波数は ',F10.3,' (Hz) です。'/
I ' 周波数コードを指定して下さい。 : (15) = '$)
READ(*,1210) FQC
PES3=ES3*98.0
WRITE(*,3060) PES3
3060 FORMAT(' 拘束圧 ( $\sigma_3$ ) は ',F7.3,' ( kPa )です。'/
I '  $\tau/\sigma_3$  ( $\tau$ :片振幅)を指定して下さい。 = '$)
READ(*,1100) TBS
PTAU=PES3*TBS
TAU=PTAU/98.0
C
9 WRITE(*,3100) TITLE2,WAVE,CYC,FQC,SPEED,PES3,PTAU,TBS
3100 FORMAT(IH ,/' 繰返し試験条件 : '/IH ,20A4/
I IH ,' ***** サンプルング条件 ***** '/
2 IH ,' 振動周波数 (SINE WAVE) (Hz) = ',F10.3/
3 IH ,' D/A 制御周波数 (Hz) = ',F10.3/
4 IH ,' 周波数コード (DEC) = ',I5/
5 IH ,' サンプルング速度 (Hz) = ',F10.3/
6 IH ,' 有効拘束圧 ( $\sigma_3$ ) (kPa) = ',F10.3/
7 IH ,' 振動片振幅 (kPa) = ',F10.3/
8 IH ,' ----- ( $\tau/\sigma_3$ ) = ',F10.3//)
WRITE(*,1650)
READ(*,1000) ANS
IF(ANS.EQ.'Y'.OR.ANS.EQ.'y') GO TO 7
IF(ANS.EQ.'N'.OR.ANS.EQ.'n') GO TO 14
GO TO 9
7 WRITE(6,3100) TITLE2,WAVE,CYC,FQC,SPEED,PES3,PTAU,TBS
C
WRITE(NTL) WAVE,PES3,PTAU
C
71 CALL PSCLSG(ICHN,NCHN,VOLT,VAL,ZERO,VCAL,HIGHT,WIDTH,
I VOLSP,AREA,DRAIN,SG1,SG2,SG3,0,0.0)
HGHT=HIGHT-VAL(1)*0.1

```



```

      VLSP0=VOLSP+VAL(NCHN+1)
      DPTH0=VLSP0/HGHT0/WIDTH
      WRITE(*,3200) HGHT0,WIDTH,DPTH0,VLSP0
3200  FORMAT(1H,' ***** 繰返し載荷前の供試体の状態 ***** /
      1 1H,'   高さ : ',F8.3,' cm' /
      1 1H,'   幅   : ',F8.3,' cm' /
      1 1H,'   奥行 : ',F8.3,' cm' /
      1 1H,'   体積 : ',F8.3,' cm3' //)
      WRITE(*,1650)
      READ(*,1000) ANS
      IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 71
      WRITE(6,3200) HGHT0,WIDTH,DPTH0,VLSP0
C *
C ***** ② 非排水繰返し載荷制御 *****
C *
C *** MULTI-A/D SAMPLING ( Using ANALOG-PRO DMA )
      NAD=11
      FLNM(1)='C:'
      FLNM(4)='DD'
      WRITE(FFF,'(A2,A2,A2,A2)') FLNM(1),FLNM(2),FLNM(3),FLNM(4)
      OPEN(NAD,FILE=FFF,STATUS='NEW',FORM='UNFORMATTED')
C
*      CALL DACHK(ICHN,NCHN,UPVAL,DNVAL,ZERO,VCAL)
*
      UPVAL=-0.00319*VCAL(2)
      DNVAL=+0.00318*VCAL(2)
C ***** パラメータ変更日 1988-12-10 (Sat) *****
C
      CALL SNGLAD(1,0,ICHN,NCHN,VOLT)
      DO 50 I=ICHN+1,ICHN+NCHN
        VAL(I)=(VOLT(I)-ZERO(I))*VCAL(1)
50    CONTINUE
      PORE0=VAL(4)
C
      CALL PSDAAD(ICHN,NCHN,FQC,PTAU,UPVAL,DNVAL,HIGHT,VOLSP,
& ZERO,VCAL,VAL,NSMP,NAD)
C *
C ***** ③ 結果の出力 *****
C
      WRITE(*,3300) NSMP
3300  FORMAT(' 全サンプリング数 = ',I5/)
      WRITE(*,3310)
3310  FORMAT(' 結果 (数値) のプリントアウト? ( Y or N ) '$)
      READ(*,1000) PRANS
      IF(PRANS.EQ.'Y'.OR.PRANS.EQ.'y') WRITE(6,3320)

```

```

3320  FORMAT(1H,'109('-')/1H,'I NO I TIME I DISP ',
      1 'I AXSTRN I LOAD I SIG-1 I SIG-2 I SIG-3 ',
      2 'I PORE I Q I P I' /
      3 1H,'I (sec) I (mm) I (%) I (kg) ',
      4 'I',6('KG/CM*2)I')/
      5 1H,'109('-'))
C
      WRITE(NTL) NSMP
      REWIND(NAD)
      SMP4=1FIX(CNTL/4.0/SINT)
C
      DO 300 II=1,NSMP
        READ(NAD) NNN,(VOLT(K),K=ICHN+1,ICHN+NCHN)
        IF(II.EQ.1) GO TO 101
        DO 100 JJ=ICHN+1,ICHN+NCHN
          VAL(JJ)=(VOLT(JJ)-ZERO(JJ))*VCAL(JJ)
100    CONTINUE
C
101    TIMSEC=FLOAT(II)/SPEED
        HGHT=HIGHT-VAL(1)*0.1
        DISP=(HGHT0-HGHT)*10.0
        AXSTRN=DISP/HGHT0*10.0
        AREA=VLSP0/HGHT
        AREAP=VOLSP/WIDTH
        PORE=VAL(4)-PORE0
        SIG1=VAL(2)/AREA-VAL(4)+VAL(5)
        SIG2=VAL(3)/AREAP-VAL(4)+VAL(5)
        SIG3=VAL(5)-VAL(4)
        DFSTRS=SIG1-SIG3
        STMEAN=(SIG1+SIG2+SIG3)/3.0
C
200    WRITE(NTL) II,AXSTRN,SIG1,SIG2,SIG3,PORE
C
        IF(PRANS.EQ.'Y'.OR.PRANS.EQ.'y') WRITE(6,3330) II,
      1 TIMSEC,VAL(1),AXSTRN,VAL(2),SIG1,SIG2,SIG3,PORE,
      2 DFSTRS,STMEAN
3330  FORMAT(1H,'I',I5,' I',F9.2,' I',2(F8.4,' I'),F8.3,
      1 ' I',6(F8.4,' I'))
        IF(MOD(II,SMP4).NE.0) GO TO 300
        IF(PRANS.EQ.'Y'.OR.PRANS.EQ.'y') WRITE(6,3340)
3340  FORMAT(1H,'109('-'))
C
300    CONTINUE
C
        IF(PRANS.EQ.'Y'.OR.PRANS.EQ.'y') WRITE(6,3340)

```

```

      CLOSE(NAD)
C
      RETURN
      END

```

PSDAAD.FOR

```

$LARGE
      SUBROUTINE PSDAAD(ICHN,NCHN,FQC,PTAU,UPVAL,DNVAL,HIGHT,
& VOLSP,ZERO,VCAL,VAL,NSMP,NAD)
C *****
C * Program for ANALOG-PRO HANDLER ( Function Code 3 & 11 ) *
C *
C * Copyright (C) 1986 CANOPUS ELECTRONICS Co.,Ltd. *
C * Corrected by K.Uchida & T.Kimata ( Kyoto Univ.) Dec.1988 *
C *****
C <プログラムの内容>
C A/Dの (サンプリング) クロックを利用して、D/A ボード
C により応力制御で1周期あたり1000点のデジタル s i n e
C w a v e を出力する。( Available Function Code : 3 ,11 )
C D/A出力は、F Q C で与えられた周期により行われ、A/D
C サンプリングした後に出力される。データ(6000個まで)は
C S M P 個ごとに読み込まれ、配列に入れられる。配列限界より
C サンプリングは60周期までしか行えない。
C <変数の説明>
C FQC : 周波数コード ( D/A 制御用 )
C PTAU : 片振幅荷重値 ( k P a )
C UPVAL : D/A 1-Digit 増加時の荷重値の増分 ( k g )
C DNVAL : D/A 1-Digit 減少時の荷重値の増分 ( k g )
C NSMP : 全サンプリング数
C *****
C
      IMPLICIT INTEGER (A-Z)
      INTEGER*2 SPB(20)
      INTEGER*2 DA1(7),DD1(7,6000)
      INTEGER PROTYPE,PROADDR,RANGE,INTNO,BUF,DMACH,ATCADDR
      INTEGER FQC,TAU,NSMP,SINT,IDA0,IDA1,IIDA0
      REAL HIGHT,VOLSP,HGHT,AREAO,AREA,VOLT,VAL1
      REAL LDMAX,UDAMP,UPVAL,DNVAL,PTAU,DMAX,DCNTL,FACUD
      REAL ZERO(7),VCAL(7),VAL(7),VVV(7),DIGCTL(1000)
      CHARACTER*1 ANS,CHR
      COMMON SPB
      COMMON /DA/ IDA0,IDA1

```

```

      COMMON /DIM1/ DD1
C
C ***** Initialize APH *****
      PROTYPE=4
      PROADDR=#D0
      RANGE=0
      INTNO=1
      BUF=#400
      DMACH=3
      ATCADDR=#D8
      F=0
      CALL APH(ATCADDR,DMACH,BUF,INTNO,RANGE,PROADDR,PROTYPE,F)
      IF(F.EQ.0) GOTO 100
      WRITE(*,600)
      600 FORMAT(1H+,1H+,'ANALOG-PRO-DMA is not active')
      STOP
      100 CONTINUE
C
C ***** Setup SPB ( Sampling Parameter Block ) *****
      SPB(1)=VARPTR(DA1(1),0)
      SPB(2)=VARPTR(DA1(1),1)
      SPB(3)=FQC
      SPB(4)=ICHN
      SPB(5)=NCHN
      DO 10 I=ICHN,ICHN+NCHN-1
        10 SPB(6+I)=I-(1/8)*8
C
C ***** MAIN ROUTINE *****
C
C ***** Set Parameter *****
C
      FACUD=1.05
      SINT=10
      HGHT=HIGHT-VAL(1)*0.1
      AREAO=VOLSP/HGHT
      LDMAX=PTAU/98.0*AREAO
      UDAMP=(UPVAL-DNVAL)/2.0
      DMAX=LDMAX/UDAMP
C
      DO 110 I=1,1000
        DIGCTL(I)=DMAX*SIN(3.141592653*2.0*FLOAT(I-1)/1000.0)
      110 CONTINUE
C
C ***** 波形非対称分の補正 (下側振幅の矯正) *****
      DO 111 II=501,1000

```



```

DIGCTL(11)=DIGCTL(11)*FACUD
111 CONTINUE
C
IIDAQ=IDAO
C
C ***** Task Start *****
120 WRITE(*,610)
610 FORMAT(// ' 振動をスタートさせます。' /
1 '      よろしいですか ? ( Y or N ) '$)
      READ(*,620) ANS
620 FORMAT(A1)
      IF(ANS.NE.'Y'.AND.ANS.NE.'y') GO TO 120
C
      F=3
      CALL APH( 1,F )
      WRITE(*,630)
630 FORMAT('   サンプリングを開始しました。'//)
      WRITE(*,635)
635 FORMAT('   サンプリング中止 ----> [ E S C ] キー'//)
C
      K=1
      I=1
C
130 F=11
      CALL APH( SPB(1),F )
C
C ***** Control D/A *****
VOLT=FLOAT(DA1(1))*4.99756/2047.0/16.0
VAL1=(VOLT-ZERO(1))*VCAL(1)
HGHT=HIGHT-VAL1*0.1
AREA=VOLSP/HGHT
DCNTL=DIGCTL(1)/AREA*AREA
IDA=IFIX(DCNTL)+IIDAQ-1
CALL DASUB1(IDA,0)
C
      IF(MOD(I,SINT).NE.0) GO TO 150
C
      KKK=K/SINT
      DO 140 M=1,5
        DD1(M,KKK)=DA1(M)
140 CONTINUE
C
150 K=K+1
      I=I+1
      IF(I.GT.1000) I=1

```

```

C
160 CALL KEYIN(CHR)
      IF(ICHAR(CHR).EQ.27) GO TO 170
      CALL KEYIN(CHR)
      IF(ICHAR(CHR).EQ.27) GO TO 170
      GO TO 130
C
C ***** Task Stop *****
170 WRITE(*,640)
640 FORMAT('   サンプリングをやめますか ? ( Y or N ) '$)
      READ(*,650) ANS
650 FORMAT(A1)
      IF(ANS.EQ.'Y'.OR.ANS.EQ.'y') GO TO 180
      IF(ANS.EQ.'N'.OR.ANS.EQ.'n') GO TO 160
      GO TO 170
C
180 F=3
      CALL APH( 0,F )
C
C ***** Output Data *****
      NSMP=KKK
C
      DO 210 JJ=1,NSMP
        DO 200 J=1,ICHN+1,ICHN+NCHN
          VVV(J)=FLOAT(DD1(J,JJ))*4.99756/2047.0/16.0
200 CONTINUE
          WRITE(NAD) JJ,(VVV(K),K=1,ICHN+1,ICHN+NCHN)
210 CONTINUE
C
      WRITE(*,700)
700 FORMAT(// '   データをすべて書き出しました。'//)
C
      RETURN
      END

```

謝辞

本論文は、平面ひずみ条件にある土の力学特性について、種々の実験結果をもとに、これまでの一連の研究成果をまとめたものです。このテーマは、著者の京都大学農学部農工学科での卒業研究以来のものであり、京都大学の大学院生時代や大阪府立大学農学部着任以降の現在に至るまで一貫して続けてきたテーマです。

本研究を遂行するにあたり、著者が京都大学農学部在学中より大阪府立大学農学部在職中の現在まで多大なるご指導・ご助言をいただきました。京都大学長谷川高士教授には深甚なる謝意を表します。先生には、著者の研究活動のみならず、公私にわたり大変お世話になりましたこと、重ねて感謝いたしたいと思います。また、京都大学農学部丸山利輔教授、高橋強教授、河地利彦教授には、本論文をまとめるにあたり大変お世話になりました。ご多忙にもかかわらず本論文を閲読していただき、貴重なご助言をいただきました。厚くお礼申し上げます。

大阪府立大学農学部桑原孝雄教授には、著者が同大学に勤務し始めてから今日に至るまで常に助言や励ましをいただき、感謝しております。また、桑原教授をはじめ、同じ研究室のスタッフであります小山修平助教、石黒寛先生（現三重大学助教）、上田和夫先生には、この学位論文の仕上げを最優先にと時間的な余裕と研究環境を与えていただき、重ねて感謝いたします。

京都大学在学中、内田一徳助教（現神戸大学助教）には深夜まで実験を指導していただき、土質実験の方法や結果の考え方などを教えていただきました。菊沢正裕先生（現福井県立大学教授）や村上章先生（現京都大学助教）にも数々の励ましやご助言をいただきました。先生方のおかげにより大学院へ進み、研究を続けながらこのように学位論文をまとめることができました。改めて感謝したいと思います。

この他にも、京都大学農学部長谷川研究室の先輩方や後輩諸君をはじめ、数多くの方々からご助言や暖かい励ましを受けました。深く感謝いたしますとともに心から厚くお礼申し上げます。